



TESIS DOCTORAL POR COMPENDIO DE PUBLICACIONES

**MODELLING FUNCTIONAL SERVICE LIFE USING FUZZY LOGIC.  
APPLICATION TO HERITAGE BUILDINGS**

MODELADO DE VIDA ÚTIL FUNCIONAL USANDO LÓGICA DIFUSA.  
APLICACIÓN A EDIFICIOS PATRIMONIALES

Presentada por **ANDRÉS JOSÉ PRIETO IBÁÑEZ** para  
optar al grado de doctor en Arquitectura por la Universidad de Sevilla

Directores:

FCO. JAVIER ALEJANDRE SÁNCHEZ

JUAN MANUEL MACÍAS BERNAL

ANA SILVA MATOS

Programa de Doctorado de Arquitectura (RD 99/2011)

Universidad de Sevilla

2017



**Universidad de Sevilla**

Dpto. Construcciones Arquitectónicas II

**MODELLING FUNCTIONAL SERVICE LIFE USING FUZZY LOGIC.  
APPLICATION TO HERITAGE BUILDINGS**

**MODELADO DE VIDA ÚTIL FUNCIONAL USANDO LÓGICA DIFUSA.  
APLICACIÓN A EDIFICIOS PATRIMONIALES**

TESIS DOCTORAL

**ANDRÉS JOSÉ PRIETO IBÁÑEZ**

Vº Bº de los Directores,

Fdo. Dr. Francisco Javier Alejandro Sánchez

Dpto. Construcciones Arquitectónicas II

ETSIE, Universidad de Sevilla

Fdo. Dr. Juan Manuel Macías Bernal

Dpto. Construcciones Arquitectónicas II

ETSIE, Universidad de Sevilla

Fdo. Dra. Ana Silva Matos

Dpto. Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos

IST, Universidade de Lisboa

Sevilla, a 30 de junio de 2017





## **MENCIÓN DOCTORADO INTERNACIONAL**

Con el objetivo de obtener el grado de Doctor con *Mención Internacional*, esta tesis doctoral está en cumplimiento con los requisitos marcados por el artículo 15 del Real Decreto 99/2011, de 28 de enero, por el que se regulan las enseñanzas oficiales de doctorado:

1. Que durante el período de formación necesario para la obtención del título de doctor, el doctorando ha realizado una estancia mínima de tres meses fuera de España en una enseñanza superior o centro de investigación de prestigio, realizando trabajos de investigación.
2. Que parte de la tesis doctoral, al menos el resumen y las conclusiones, se ha redactado y presentado en una de las lenguas habituales para la comunicación científica en su campo de conocimiento, distinta a cualquiera de las lenguas oficiales de España.
3. Que la tesis ha sido informada por un mínimo de dos expertos doctores pertenecientes a alguna institución de educación superior o instituto de investigación no española.
4. Que al menos un experto perteneciente a alguna institución de educación superior o centro de investigación no española, con el título de doctor, y distinto del responsable de la estancia mencionada en el apartado (1), forma parte del tribunal evaluador de la tesis.



## ESTRUCTURA Y JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL

La organización y formato de esta tesis doctoral es por compendio de trabajos previamente publicados, de acuerdo con el artículo 9 de la normativa reguladora del régimen de tesis doctoral (Acuerdo 9.1/CG 19-4-12) se pueden presentar para su evaluación como tesis doctoral un conjunto de trabajos publicados por el doctorando.

El conjunto de trabajos está relacionado con el **Plan de Investigación (PI)** y el **Documento de Actividades del Doctorando (DAD)** inicialmente presentados y regulados por el RD 99/2011. Se opta a esta modalidad en cumplimiento con los requisitos establecidos en el artículo 8 de la normativa reguladora del régimen de tesis doctoral.

Para el compendio de publicaciones se establecen como requisitos mínimos 2 artículos o capítulos de libro publicados o aceptados, siendo el doctorando primer autor y con un máximo de cuatro autores.

Esta tesis doctoral se constituye con un total de seis artículos publicados con fecha de publicación posterior a la primera matrícula de tutela académica. Este documento consiste en una síntesis de conceptos que sustentan los trabajos de investigación publicados o en desarrollo en lugar del formato tradicional de documento extenso autocontenido. La documentación a presentar bajo esta modalidad se encuentra estructurada de la siguiente manera: Introducción, Objetivos, Resumen global de los resultados, Discusión y Conclusiones.

Además se añade una copia completa de las publicaciones en el capítulo de anexos. En cuanto al informe de los directores de tesis con la aprobación del órgano responsable sobre la idoneidad de esta modalidad, el informe de relevancia científica de la publicaciones, la aceptación de los coautores para la presentación de los trabajos como tesis doctoral, así como la renuncia de las personas coautoras a presentar los trabajos como parte de otra tesis, aparece certificado en la sección - Tesis por compendio de publicaciones.



## TESIS POR COMPENDIO DE PUBLICACIONES

- Dr. Francisco Javier Alejandro Sánchez, Profesor Titular del Dpto. Construcciones Arquitectónicas II, ETSIE, Universidad de Sevilla,
- Dr. Juan Manuel Macías Bernal Profesor Titular de Escuela Universitaria del Dpto. Construcciones Arquitectónicas II, ETSIE, Universidad de Sevilla y
- Dra. Ana Silva Matos del Dpto. Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, IST, Universidade de Lisboa, Portugal.

### CERTIFICAN

1. Que el doctorando **Andrés José Prieto Ibáñez**, Grado en Ciencia y Tecnología de Edificación y Máster Universitario en Gestión Integral de Edificación ambos títulos por la Universidad de Sevilla, ha realizado bajo su dirección el trabajo de Tesis Doctoral que lleva por título “**Modelling functional service life using fuzzy logic. Application to heritage buildings / Modelado de vida útil funcional usando lógica difusa. Aplicación a edificios patrimoniales**”.
2. Que **revisado el trabajo**, expresan su conformidad para que éste sea sometido a defensa frente al Tribunal correspondiente, ya que consideran que el documento **reúne los requisitos necesarios para optar al grado de Doctor**.
3. Que habiéndose realizado la **Memoria de Tesis** por la modalidad de **compendio de publicaciones**, siendo el doctorando el primer firmante y siendo ellos los otros coautores de dichas publicaciones, declaran que el doctorando ha sido responsable del trabajo, participando interactivamente con ellos, en el análisis de resultados, extracción de conclusiones y en la redacción de los trabajos publicados.
4. Que **ninguna de las publicaciones compendiadas** en esta Tesis Doctoral ha sido ni será utilizada por otros para la realización de una tesis doctoral.
5. Que los **indicadores de calidad** de las publicaciones recogidas en esta tesis son los siguientes:

- **Building, Research & Information**, índice de impacto Journal Citation Reports (JCR - 2015) 2.196, posición nº 10 de 61 títulos incluidos en el campo Construction & Building Technology (Q1).
- **Journal of Cultural Heritage**, índice de impacto Journal Citation Reports (JCR - 2014) 1.568, posición nº 130 de 260 títulos incluidos en el campo Materials Science, Multidisciplinary (Q2) y (JCR - 2015) 1.533, posición nº 148 de 271 títulos incluidos en el campo Materials Science, Multidisciplinary (Q3).
- **Journal of Materials in Civil Engineering**, índice de impacto Journal Citation Reports (JCR - 2014) 1.296, posición nº 19 de 59 títulos en el campo de Construction & Building Technology (Q2).
- **International Journal of Architectural Heritage**, índice de impacto Journal Citation Reports (JCR 2015) 1.025, posición nº 28 de 61 títulos incluidos en el campo Construction & Building Technology (Q2).
- **Journal of Performance of Constructed Facilities**, índice de impacto Journal Citation Reports (JCR 2015) 0.893, posición nº 35 de 61 títulos incluidos en el campo de Construction & Building Technology (Q3).

Sevilla, a 30 de junio de 2017

Fdo. Dr. F. J. Alejandro Sánchez

Fdo. Dr. J. M. Macías Bernal

Fdo. Dra. A. Silva Matos

Esta tesis doctoral se ha enmarcado dentro del proyecto de investigación: “ART-RISK Inteligencia artificial aplicada a la conservación preventiva de edificios patrimoniales” financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España y los Fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER), (code: BIA2015-64878-R (MINECO/FEDER, UE)).

## PUBLICACIONES EN REVISTAS ISI - index

Esta tesis doctoral está sustentada en los siguientes artículos originales y publicados en revistas internacionales ISI-index (ver anexo 1):

- I. **Prieto, A. J.**, Macías-Bernal, J. M., Chávez, M.-J., Alejandre, F. J. (2016). *Expert system for predicting buildings service life under ISO 31000 standard. Application in architectural heritage*. **Journal of Cultural Heritage**, 18, 209-218. DOI: 10.1016/j.culher.2015.10.006.
- II. **Prieto, A. J.**, Silva, A., de Brito, J., & Alejandre, F. J. (2016). Functional and Physical Service Life of Natural Stone Claddings. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 28(12), 04016150. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001663.
- III. **Prieto, A. J.**, Silva, A., de Brito, J., & Macias-Bernal, J. M. (2017). Serviceability of facade claddings. **Building Research & Information**, 1-12. DOI: 10.1080/09613218.2016.1264808.
- IV. **Prieto, A. J.**, Silva, A., de Brito, J., Macías-Bernal, J. M., & Alejandre, F. J. (2017). The Influence of Pathological Situations on Churches' Functionality: An Approach Based on Historical Records. **International Journal of Architectural Heritage**, 1-22. DOI: 10.1080/15583058.2016.1272011.
- V. **Prieto, A. J.**, Macías-Bernal, J. M., Chávez, M. J. and Alejandre, F. J. (2017). Fuzzy modelling in functional service life of architectural heritage buildings. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, 04017041. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001021.
- VI. **Prieto, A. J.**, Silva, A., de Brito, J., Macías-Bernal, J. M., & Alejandre, F. J. (2017). Multiple linear regression and fuzzy logic models applied to the functional service life prediction of cultural heritage. **Journal of Cultural Heritage**. DOI: 10.1016/j.culher.2017.03.004.

## CONGRESOS INTERNACIONALES

- I. **Prieto, A. J.**, Macías-Bernal, J. M., Alejandre, F. J. and Silva, A. A fuzzy expert system in buildings serviceability. **XIV DBMC - 14th International Conference on Durability of Building Materials and Components**, 29-31 May 2017, Ghent, Belgium.
- II. **Prieto, A. J.**, Macías-Bernal, J. M., Chávez, María-José, Alejandre, F. J., Silva, A. and Ortiz, P. *Fuzzy logic applied to the analysis of the heritage buildings' performance*. **3<sup>rd</sup> TechnoHeritage2017 International Congress on Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage**, 21-24 May 2017, Cádiz, Spain.
- III. Alejandre F. J., Chávez M.-J., Macías-Bernal J. M., **Prieto A. J.** *Functional Service Life of Buildings using Fuzzy*. **Workshop RTRT 16: Ramsey Theory and Related Topics**, 24-27 October 2016, Seville, Spain. (Poster).
- IV. **Prieto, A. J.**, Chávez, M.-J, Garrido-Vizuite, M. A., Macías-Bernal, J. M. and Cagigas-Muñiz, D. *Time Series on Functional Service Life of Buildings using Fuzzy Delphi Method*. **CMMSE 2016 - 16<sup>th</sup> International Conference Computational and Mathematical Methods in Science and Engineering**. , 4-8 July 2016, Rota, Spain. ISBN: 13-978-84-608-6082-2.
- V. **Prieto, A. J.**, Macías-Bernal, J. M. y Chávez, M. J. *Series Temporales de Factores Principales para la Conservación Preventiva del Patrimonio*. **PATORREB 2015 - 5º Congreso de Patología y Rehabilitación de Edificios**, 26-28 March 2015, Porto, Portugal. ISBN: 78-972-752-177-7.
- VI. Macías-Bernal, J. M. y **Prieto, A. J.** *Heritage Conservation with Expert System*. **I International Meeting of Young Researchers on Heritage**, 19-21 November 2014, Baeza, Spain.



## ESTANCIAS INTERNACIONALES DE INVESTIGACIÓN

- I. **Universidad Austral de Chile - UACH, Valdivia, Chile.** RiNA – Núcleo de investigación en Riesgos Naturales y Antropogénicos. Responsable: Dra. Virginia Vásquez. Tiempo de la estancia **56 días** (25 marzo, 2017 – 19 mayo, 2017).
- II. **Istituto Universitario di Architettura di Venezia - IUAV, Università luav di Venezia, Italia.** DACC - Dipartimento di Architettura Costruzione Conservazione. Dorsoduro 2206, Terese 30135 Venezia. Italia. Responsable: Brenno Albrecht. Tiempo de la estancia **90 días** (21 de septiembre, 2016 – 22 de diciembre, 2016).
- III. **Instituto Superior Técnico - IST, Universidad de Lisboa, Portugal.** DECivil - Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos. Av. Rovisco Pais 1049-001 Lisboa Codex. Portugal. Supervisores: Full Professor Jorge Manuel Calíço Lopes de Brito and PhD. Ana Filipa Ferreira da Silva. Tiempo de la estancia **105 días** (06 de junio, 2016 – 16 de septiembre, 2016).
- IV. **Instituto Superior Técnico - IST, Universidad de Lisboa, Portugal.** DECivil - Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos. Av. Rovisco Pais 1049-001 Lisboa Codex. Portugal. Supervisor: Full Professor Jorge Manuel Calíço Lopes de Brito. Tiempo de la estancia **99 días** (14 de septiembre, 2015 – 18 de diciembre, 2015).



*A mis padres*



## AGRADECIMIENTOS

*Agradecer es siempre muy difícil, sobre todo, cuando se pretende dar las gracias por algo tan inmaterial como el apoyo. Por eso no me gustaría olvidar a ninguna de las personas que, aunque sólo haya sido a través de una conversación de máquina de café, me han dado ánimos para seguir con este trabajo, porque... sí, la tesis es un trabajo.*

*En primer lugar, mi mayor agradecimiento a mis tres directores de tesis Dr. Juan Manuel Macías Bernal, Dr. Fco. Javier Alejandro Sánchez y Dra. Ana Silva Matos, quienes me han guiado y ayudado durante estos cuatro años de formación como investigador y porque nunca he dejado de sentir su confianza y apoyo para conducir el desarrollo de esta investigación. Sus orientaciones y conocimientos han sido fundamentales para su finalización.*

*A la Dra. María José Chávez de Diego, colaboradora en esta investigación desde los inicios y quien siempre me ha mostrado su apoyo. Gracias María José por todas esas lecciones, tanto las matemáticas como las de la vida.*

*A la Dra. Pilar Ortiz Calderón, Investigadora Principal del Proyecto de Investigación ART-RISK – (BIA2015-64878-R), por todas sus aportaciones y recomendaciones durante el desarrollo de este trabajo.*

*Agradezco al Instituto Superior Técnico de la Universidad de Lisboa, especialmente al doctor Jorge de Brito, a su grupo de investigación y de nuevo a la Dra. Ana Silva, por haberme acogido como un miembro más de su equipo durante mis estancias en Portugal y por transmitirme tanto entusiasmo por la investigación. Siempre estaré agradecido por darme la oportunidad de trabajar con ellos, abriéndome las puertas de sus despachos en septiembre de 2015, y por todas y cada una de las horas que me dedicaron durante los meses que estuve de estancia en Lisboa y después vía Skype. De nuevo, gracias.*

*Dar las gracias también a todas las personas que me han acogido en sus universidades para realizar mis períodos de investigación en Portugal, Italia y Chile. Quiero agradecer en especial a la Dra. Virginia Vásquez por su invitación y apoyo durante mi estancia en el Instituto de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Austral de Chile, Valdivia.*

*No puedo pasar sin acordarme de mis amigos y compañeros de doctorado del Dpto. de Construcciones Arquitectónicas II de la Universidad de Sevilla y en especial de Patricia, Alejandro y Desirée. Gracias por vuestro apoyo en los períodos de crisis y por todos esos momentos, tanto dentro como fuera de la Sala de Investigación. Agradezco también al resto del personal del Departamento Amparo, Martín y al director Dr. Valeriano Lucas Ruiz por su apoyo a la investigación en tiempos difíciles.*

*A todos mis amigos, y especialmente a Rafa B., Rafa C., Manolo, Dani, Fide, Patri, Mónica, Miriam, Lola gracias apoyarme en este tiempo y por escucharme en los momentos críticos. Sin duda me quedo con todas esas charlas filosóficas e interminables sobre la vida.*

*En último lugar, pero no por ello menos importante, quiero agradecer a mi familia. Ellos son los que siempre están ahí y los que me transmiten desde Atarfe la fuerza necesaria para continuar.*

*A mis tíos José Luis y M<sup>a</sup> Cruz por esos cafés después de comer acompañados con algún que otro dulce rico.*

*A mi abuela M<sup>a</sup> Luisa, por su esperanza en que los jóvenes podamos encontrar un hueco después de tanto esfuerzo y dedicación.*

*A mi buelo José porque allá donde esté, siento que me sigue enviando fuerza para continuar.*

*A mi padre por trasmitirme su optimismo, ánimo y sabios consejos en los momentos cuando más lo necesitaba.*

*A mi madre por tener siempre un momento para escucharme a cualquier hora del día, y porque a veces aún me sigue preguntando si me he puesto el chaquetón.*

*A mi hermana por todos esos cientos de correos cruzados durante mis estancias fuera, actualizándome casi minuto a minuto la situación en Granada.*

*A todos gracias de corazón, esto no habría sido posible sin vuestro apoyo.*



TESIS DOCTORAL POR COMPENDIO DE PUBLICACIONES

**MODELLING FUNCTIONAL SERVICE LIFE USING FUZZY LOGIC.  
APPLICATION TO HERITAGE BUILDINGS**

MODELADO DE VIDA ÚTIL FUNCIONAL USANDO LÓGICA DIFUSA.  
APLICACIÓN A EDIFICIOS PATRIMONIALES

Presentada por **ANDRÉS JOSÉ PRIETO IBÁÑEZ** para  
optar al grado de doctor en Arquitectura por la Universidad de Sevilla

Directores:

FCO. JAVIER ALEJANDRE SÁNCHEZ

JUAN MANUEL MACÍAS BERNAL

ANA SILVA MATOS

Programa de Doctorado de Arquitectura (RD 99/2011)

Universidad de Sevilla

2017





# ÍNDICE DE CONTENIDOS / INDEX OF CONTENTS

	<b>RESUMEN / ABSTRACT</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN / INTRODUCTION</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>ESTADO DEL ARTE / STATE-OF-THE-ART</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS / OBJECTIVES</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA / METHODOLOGY</b>	<b>39</b>
<b>5</b>	<b>PRINCIPALES RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>44</b>
5.1	Desarrollo matemático del modelo de vida útil funcional	45
5.2	Sistema experto en cumplimiento con la normativa ISO 31000 de gestion del riesgo	55
5.3	Aplicaciones teórico-prácticas del modelo de predicción de vida útil fun- cional	63
5.4	Análisis de la influencia de las variables de entrada del modelo difuso mediante regresión múltiple lineal	77
5.5	Registros histórico-temporales en el estudio de la vida útil funcional de edificios patrimoniales	87
5.6	Validación del sistema $FBSL_{2.0}$ a través del modelo de degradación física $S_w$	97
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES / CONCLUSIONS</b>	<b>113</b>
<b>7</b>	<b>FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN / FUTURE RESEARCH LINES</b>	<b>117</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>121</b>
	<b>ANEXOS: Anexo 1. Artículo publicados ISI-index</b>	<b>133</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 5.1.</b> Variables de entrada del modelo difuso <i>FBSL</i> <sub>2.0</sub> y valoración descriptiva.	<b>48</b>
<b>Tabla 5.2.</b> Perfiles de los profesionales expertos encuestados*.	<b>50</b>
<b>Tabla 5.3.</b> Categorías de las variables de entrada del modelo difuso <i>FBSL</i> <sub>2.0</sub> .	<b>61</b>
<b>Tabla 5.4.</b> Casos de estudio sobre vulnerabilidad y riesgos externos teóricos.	<b>66</b>
<b>Tabla 5.5.</b> Niveles de funcionalidad de los edificios según el sistema ( <i>FBSL</i> <sub>2.0</sub> )	<b>73</b>
<b>Tabla 5.6.</b> Estudio de funcionalidad de los 20 casos de estudio actualizados a 2017.	<b>74</b>
<b>Tabla 5.7.</b> Registros históricos de la parroquia de Santa Marina desde 1250 – 2016.	<b>94</b>
<b>Tabla 5.8.</b> Funcionalidad como criterio para la planificación del mantenimiento en revestimientos de piedra natural.	<b>110</b>
<b>Tabla 5.9.</b> Funcionalidad como criterio para la planificación del mantenimiento en revestimientos cerámicos.	<b>110</b>
<b>Tabla 5.10.</b> Funcionalidad como criterio para la planificación del mantenimiento en revestimientos de pintura.	<b>110</b>
<b>Tabla 5.11.</b> Funcionalidad como criterio para la planificación del mantenimiento en revestimientos de revocos.	<b>110</b>

## Índice de Figuras

<b>Fig. 4.1.</b> Esquema metodológico de la tesis doctoral.	<b>42</b>
<b>Fig. 5.1.</b> Estructura jerárquica del sistema de inferencia difuso.	<b>51</b>
<b>Fig. 5.2.</b> Modelo <i>Fuzzy Building Service Life</i> avanzado ( <i>FBSL<sub>2.0</sub></i> ) ajustado a la ISO 31000.	<b>58</b>
<b>Fig. 5.3.</b> Evolución de la vida útil funcional en base a los nueve casos de estudio teórico.	<b>68</b>
<b>Fig. 5.4.</b> Situación de los 20 casos de estudio en la Archidiócesis de Sevilla.	<b>69</b>
<b>Fig. 5.5.</b> Imágenes de la muestra de edificios patrimoniales analizados.	<b>71</b>
<b>Fig. 5.6.</b> Hoja de inspección para el examen visual ( <a href="#">Macías-Bernal et al. 2014</a> ).	<b>75</b>
<b>Fig. 5.7.</b> Peso relativo de las variables incluidas en el modelo global de 11 variables.	<b>83</b>
<b>Fig. 5.8.</b> Peso relativo de las variables incluidas en el modelo simplificado de 6 variables.	<b>84</b>
<b>Fig. 5.9.</b> Vida útil funcional a través del tiempo en la iglesia de Sta. Marina, Sevilla.	<b>92</b>
<b>Fig. 5.10.</b> Frecuencia de las anomalías en los elementos constructivos de edificios históricos, en base a los 390 registros de las 20 iglesias analizadas.	<b>95</b>
<b>Fig. 5.11.</b> Situación de los sistemas constructivos de fachadas analizados en Portugal (Lisboa, Alameda y la región de Algarve).	<b>99</b>
<b>Fig. 5.12.</b> Ejemplo de casos de estudio con revestimientos de piedra natural, en Portugal.	<b>102</b>
<b>Fig. 5.13.</b> Nivel de degradación física y funcional en revestimientos de piedra natural, analizando 203 casos de estudio.	<b>104</b>
<b>Fig. 5.14.</b> Casos de estudio que ilustran los revestimientos cerámicos en sistemas constructivos de fachadas, en Portugal.	<b>105</b>
<b>Fig. 5.15.</b> Nivel de degradación física y funcional en revestimientos cerámicos, analizando 183 casos de estudio.	<b>105</b>
<b>Fig. 5.16.</b> Casos de estudio con revestimientos de pinturas en fachadas, en Portugal.	<b>106</b>
<b>Fig. 5.17.</b> Nivel de degradación física y funcional en revestimientos de pinturas, analizando 177 casos de estudio.	<b>107</b>
<b>Fig. 5.18.</b> Ejemplos de casos de estudio con revestimientos del tipo revoco, en Portugal.	<b>108</b>
<b>Fig. 5.19.</b> Degradación física y funcionalidad en revestimientos de revocos, analizando 84 casos de estudio.	<b>108</b>



## RESUMEN

La presente tesis doctoral constituye una aportación en el campo de la conservación preventiva de edificios patrimoniales, a través del análisis de su degradación funcional. En este sentido, se ha continuado avanzando y desarrollando el sistema experto *Fuzzy Building Service Life* – (FBSL) diseñado en el seno de la ETSIE de la Universidad de Sevilla. Este método sustentado en lógica difusa es capaz de realizar predicciones de funcionalidad de edificios, gestionando las vulnerabilidades y los riesgos que afectan en su rendimiento.

En esta investigación, se han abordado nuevas aplicaciones teóricas y prácticas que contribuyen a la aplicabilidad y generalización del modelo. El estudio de casos práctico se ha conformado por templos religiosos construidos entre los siglos XIII y XVII, y ubicados en el suroeste de España, provincia de Sevilla.

La metodología FBSL ha sido normalizada mediante el análisis de la normativa internacional de gestión del riesgo ISO 31000:2009 y la normativa europea EN 31010:2011, demostrando que el modelo cumple con las especificaciones de dichas normas. Además, el Instituto de Patrimonio Cultural de España (IPCE) en su Plan Nacional de Conservación Preventiva (PNCP) recomienda la utilización de la ISO 31000 como herramienta para la gestión, apreciación, seguimiento y control de los riesgos en conservación de patrimonio.

Posteriormente, se ha llevado a cabo un análisis mediante regresión múltiple li-

## ABSTRACT

This doctoral thesis makes a contribution to the field of preventive conservation of heritage buildings through the analysis of their functional degradation. In this sense, we have continued to advance and develop the Fuzzy Building Service Life - (FBSL) expert system designed at the Department of Building Construction (ETSIE) of the University of Seville. This fuzzy logic-based method is able to predict building functionality, managing vulnerabilities and risks that affect their performance.

This research addressed new theoretical and practical applications that contribute to the applicability and general implementation of the model. The practical case study focused on churches built between the 13th and 17th centuries and located in the province of Seville in southwest Spain.

The FBSL methodology was standardized based on an analysis of the ISO 31000:2009 international standard on risk management and the European standard EN 31010:2011, demonstrating that the model complies with the specifications of these standards. Additionally, the National Institute of Cultural Heritage ("Instituto de Patrimonio Cultural de España" - IPCE - in Spanish) in its National Preventive Conservation Plan ("Plan Nacional de Conservación Preventiva" - PNCP - in Spanish) recommends the use of ISO 31000 as a tool for the management, assessment, monitoring and control of risks in heritage conservation.

Subsequently, a linear multiple regression analysis was performed to classify

near con el fin de clasificar las variables de entrada del sistema en base a la influencia que ejercen en el resultado final del modelo - estimación de la funcionalidad de edificios -, considerando además una reducción en el número de entradas y destacando aquellas que presentan un mayor peso en el parámetro de salida. Para ello, se han evaluado un total de 100 edificios históricos ubicados en el sur de España.

El modelo *FBSL* ha sido comprobado mediante la correlación con otro sistema de predicción de vida útil física de materiales de construcción (que establece un índice para valorar la degradación global de un elemento de la construcción, designado severidad de degradación ( $S_w$ )) desarrollado por el IST de la Universidad de Lisboa (Portugal). En este sentido, se han analizado conjuntamente condiciones de degradación física y funcional de sistemas constructivos de fachadas en Lisboa (Portugal), obteniendo fuertes coeficientes de determinación para el conjunto de muestras analizadas, permitiendo asociar a la escala de prioridad de intervención un período temporal para realizar las acciones de mantenimiento.

Por último, se han identificado las principales deterioros que pueden afectar a estas tipologías de edificios históricos, analizando sus causas más frecuentes y evaluando la influencia de estas patologías en el nivel funcionalidad de las construcciones. Para llevar a cabo este análisis, se han recolectado un total de 390 registros histórico-temporales en una muestra de 20 iglesias parroquiales ubicadas en la provincia de Sevilla. Esta aplicación proporciona información de gran utilidad para la definición de futuros planes de mantenimiento preventivo.

the input variables of the system based on the influence they had on the final result of the model, namely the estimation of building functionality, also considering a reduction in the number of entries and highlighting those presenting greater weight in the output parameter. For this purpose, a total of 100 historic buildings located in the south of Spain were evaluated.

The *FBSL* model was verified by correlating it with another system for predicting the functional service life of building materials (which establishes an index for assessing the overall degradation of a building element, called "degradation severity" ( $S_w$ )), developed by the School of Engineering (IST) of the University of Lisbon (Portugal). In this sense, the conditions of physical and functional degradation of façade construction systems in Lisbon (Portugal) were analyzed together, obtaining strong determination coefficients for the entire sample analyzed, and allowing the scale of intervention priority to be associated with a specific period for performing maintenance activities.

Finally, the main types of deterioration affecting these historical buildings were identified, analysing their most frequent causes and evaluating the influence of these pathologies on the level of functionality of the buildings analyzed. To carry out this analysis, a total of 390 historical time series records were gathered in a sample of 20 parish churches located in the province of Seville. This application provides very useful information for defining future preventive maintenance plans.

Se puede considerar que el principal aporte de esta tesis es un sistema experto evolucionado en el campo de la predicción de la vida útil funcional de edificios FBSL2.0, donde se aportan 6 principales mejoras al sistema inicial: 1) Desarrollo matemático pormenorizado de la metodología fuzzy; 2) Normalización con la normativa internacional ISO 31000:2009 de gestión del riesgo; 3) Nuevas aplicaciones teóricas y prácticas; 4) Análisis por medio de regresión múltiple lineal para identificar estadísticamente el peso de cada una de las variables en el output del sistema; que ha permitido la simplificación del modelo; 5) Validación con otra metodología de predicción de vida útil ampliamente testada y publicada; y finalmente el 6) Estudio de datos histórico-temporales con el fin de evaluar la influencia de pasadas situaciones patológicas en el futuro estado de funcionalidad de los edificios.

**PALABRAS CLAVE**

Patrimonio arquitectónico; lógica difusa; vida útil funcional; vulnerabilidad; gestión del riesgo; series temporales

The main contribution of this doctoral thesis is an evolved expert system for predicting the functional useful life of buildings - FBSL2.0 -, with six (6) main improvements having been made to the initial system: 1) detailed mathematical development of the fuzzy methodology; 2) standardization with the ISO 31000:2009 international risk management standard; 3) new theoretical and practical applications; 4) linear multiple regression analysis to statistically identify the weight of each variable in the system output, enabling the simplification of the model; 5) validation with another widely tested and published functional useful life prediction methodology; and finally, 6) the study of historical time series data to evaluate the influence of past pathological situations on the future functionality status of buildings.

**KEYWORDS**

Architectural heritage; fuzzy logic; functional life; vulnerability; risk management; time series.





# **1 INTRODUCCIÓN / INTRODUCTION**

---



A continuación, se presenta la relevancia del trabajo y la justificación del tema, un breve estado del arte y los principales objetivos a desarrollar en la presente Tesis Doctoral enmarcada dentro del proyecto de investigación: "ART-RISK Inteligencia artificial aplicada a la conservación preventiva de edificios patrimoniales" financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España y los Fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER), (code: BIA2015-64878-R (MINECO/FEDER, UE)).

## 1 Introducción

La creciente escasez de fondos para el mantenimiento y la rehabilitación de las infraestructuras y los edificios requiere de un enfoque cada vez más racional de la toma de decisiones en materia de preservación de edificios (Paulo et al. 2014). Para posibilitar este enfoque racional del mantenimiento, se debe considerar una evaluación eficiente de la vida útil que tenga en cuenta las propiedades del material, las condiciones de diseño, la mano de obra, las condiciones ambientales de exposición y la planificación programática del mantenimiento (ISO 15686-1 2000). Sin embargo a estas cuestiones hay que añadir la complejidad que presentan los edificios como sistemas compuestos de varios elementos, que se ensamblan entre ellos para responder a una serie de necesidades funcionales, así como de requisitos legales y ambientales que den respuesta a las necesidades de los usuarios (Kyle 2001). Además, las construcciones están diseñadas para ser utilizadas durante un cierto período de tiempo en el que estas desarrollan los requerimientos funcionales para los que fueron diseñados.

The relevance of the work and the justification of the topic is presented below, with a brief statement of the art and the main objectives to be undertaken in this dissertation, which is part of the research Project: "ART-RISK artificial intelligence applied to the preventive conservation of heritage buildings", funded by the Ministry of Economy and Competitiveness of the Government of Spain and the European Regional Development Fund (ERDF), (code: BIA2015-64878-R (MINECO/ERDF, EU)),

## 1 Introduction

The growing shortage of funds for the maintenance and rehabilitation of infrastructures and buildings requires a more rational approach to decision-making in the area of preservation of buildings (Paulo et al. 2013). To enable this rational maintenance approach, there must be an efficient evaluation of the service life that takes into account the properties of the material, the design conditions, labour, environmental conditions of exposure, and the programmed planning of the maintenance (ISO 15686-1). However to these issues should be added the complexity that buildings present as systems composed of several elements, which are assembled between them to respond to a series of functional needs, as well as legal and environmental requirements that respond to the needs of users (Kyle 2001). In addition, the buildings are designed to be used for a certain period of time in which these carry out the functional requirements for which they were designed.

En la actualidad, se han ido extendiendo cada vez más los estudios relacionados con la predicción de vida útil de edificios, debido esencialmente a la degradación progresiva del patrimonio edificado y a los altos costos asociados con la construcción, su mantenimiento y posterior reparación (Beer et al. 2011). Además de las razones antes mencionadas, la predicción de la vida útil también asume un papel importante en la sostenibilidad económica y ambiental del sector de la construcción (Hovde 2002).

Sin embargo, la vida útil de cualquier elemento puede variar significativamente de un edificio a otro, ya que cada edificio es un prototipo que responde a condiciones irrepetibles. Por lo tanto, los modelos de predicción de vida útil pretenden expresar patrones de degradación no tanto dirigidos a un edificio específico, sino a identificar los puntos comunes entre diferentes conjuntos de edificios con características similares, y de acuerdo con una serie de características clave, mecanismos de degradación o requisitos de desempeño establecidos (Silva et al. 2016).

Un grupo de investigadores, comités de normalización, universidades, fabricantes, asociaciones y consultores relacionados con el área de construcción revelan en 2005 que el 63% de los expertos encuestados creen que los métodos de predicción de la vida útil son extremadamente significativos tan sólo el 6% considera que estos modelos no son relevantes. Sin embargo, al considerar el uso de estos métodos, sólo el 40% utiliza este tipo de metodologías y el 13% asume que son totalmente ignorantes en este tema (Brisch y Englund 2005).

At present, more and more studies have been written related to the prediction of the service life of buildings, mainly due to the progressive degradation of the built heritage and the high costs associated with construction, maintenance and repair (Beer et al. 2011). In addition to the above-mentioned reasons, the prediction of service life also assumes an important role in the economic and environmental sustainability in the construction sector (Hovde 2002).

However, the service life of any element may vary significantly from one building to another, as each building is a prototype that responds to unique conditions. Therefore, the forecasting models for service life are intended to express patterns of degradation not so much aimed at a specific building, but to identify the common points between different sets of buildings with similar characteristics, and in accordance with a number of key characteristics, degradation mechanisms or performance requirements that have been established (Silva et al. 2016).

A group of researchers, standards committees, universities, manufacturers, associations and consultants related to the construction area in 2005 revealed that 63% of the experts surveyed believe that the prediction methods for service life are extremely significant as only 6% believe that these models are not relevant. However, when considering the use of these methods, only 40% used these types of methodologies and 13% assume that they are totally ignorant on this topic (Brisch and Englund 2005).

Los datos relacionados con la durabilidad, vida útil de los edificios y materiales de edificación ni siquiera están incluidos en la mayoría de los proyectos de arquitectura y construcción. Por lo tanto, aunque la utilidad de las metodologías de predicción de vida útil es ampliamente aceptada en la comunidad científica, su aplicación es todavía incipiente. Asimismo, a pesar del número de estudios sobre la vida útil y mantenimiento de edificios y componentes que se han publicado en las últimas décadas, la aplicación de tales metodologías aún presenta algunas limitaciones, debido principalmente a la complejidad de los fenómenos de degradación y a la falta de herramientas fiables para su modelado. Superar esta situación implica la adopción de una serie de supuestos dentro de las metodologías de predicción de vida útil que deben estar debidamente fundamentadas. Tal como lo menciona Field (2009), para modelar un fenómeno del mundo real, sea lo que sea, es necesario construir modelos que cubran la información recogida en esta situación real. El modelo debería funcionar como una aproximación razonablemente exacta del sistema real, que contiene una serie de parámetros importantes para su correcta descripción; sin embargo, no debe ser tan complejo ya que puede que sea imposible de entender y manipular.

Dentro del ámbito nacional, el Instituto del Patrimonio Cultural de España - IPCE, en su Plan Nacional de Conservación Preventiva - PNCP, recoge la necesidad del desarrollo de estrategias de identificación, detección y control de los factores de deterioro de los bienes culturales, consistiendo en una actuación continuada en el entorno de las edificaciones que de lugar a una optimización en términos de tiempo de intervención y

The data related to the durability, service life of the buildings and building materials are not even included in most architecture and construction projects. Therefore, although the usefulness of the methodologies for the prediction of service life is widely accepted in the scientific community, their implementation is still in its infancy. Also, despite the number of studies on the service life and maintenance of buildings and components that have been published in the last decades, the application of such methodologies still has some limitations, mainly due to the complexity of the phenomena of degradation and the lack of reliable tools for their modelling. To overcome this situation involves adopting a number of assumptions within the methodologies for the prediction of service life that must be properly substantiated. As mentioned by Field (2009), to model a real world phenomenon, whatever it is, it is necessary to build models that cover the information collected in this actual situation. The model should operate as a reasonably accurate approximation of the actual system, which contains a number of important parameters for its correct description; however, it should not be as complex as if not it may be impossible to understand and manipulate.

At national level, the Cultural Heritage Institute of Spain - IPCE, in its National Plan for Preventive Conservation - PNCP due to its acronym in Spanish, reflects the need to develop strategies for the identification, detection and control of the deterioration factors of cultural assets, consisting of a continuous action in the environment of the buildings that give rise to an optimisation in terms of time of intervention and economic and environ-

costes económicos y ambientales. Por tanto, se pretende eliminar, o en cualquier caso, minimizar los peligros, actuando sobre el origen de las causas de las situaciones patológicas observadas, que generalmente se encuentran en los factores externos al elemento patrimonial en sí.

De esta manera, la definición de herramientas eficientes y precisas para evaluar la degradación de elementos de construcción a lo largo del tiempo es un ítem cada vez más significativo, permitiendo estimar el tiempo después del cual es necesario intervenir en una edificación. Un estudio realizado por Moser (2004) discutió el trabajo realizado por diferentes autores en esta área y concluyó que se necesitaban más estudios para identificar los parámetros que influyen en la vida útil de los elementos constructivos, siendo necesario crear relaciones matemáticas viables que permitan aplicar estos métodos, principalmente debido a que el deterioro de los edificios no se produce de manera uniforme: puesto que los edificios están compuestos por varios subsistemas que se degradan a diferentes velocidades, se puede suponer que están compuestos por varias capas de durabilidad, con diferentes vidas de servicio, distintas de la vida útil de la estructura.

Esta tesis doctoral pretende proporcionar un nuevo avance en el desarrollo y perfeccionamiento en las metodologías de predicción de la vida útil funcional de los edificios existentes. En este sentido, se revisa en profundidad un sistema experto avanzado *FBSL<sub>2.0</sub>* y especializado en la predicción de la vida útil funcional de edificios históricos. Se propone una metodología basada en la teoría de los conjuntos difusos, introducida por Lotfi A.

mental costs. Therefore, the aim is to eliminate, or at any event, to minimise the dangers, acting on the origin of the causes of the pathological situations observed, which are usually found in external factors to the heritage element as such.

In this way, the definition of precise and efficient tools to assess the degradation of construction elements over time is an increasingly significant item, allowing the time after which it is necessary to intervene in a building to be estimated. A study by Moser (2004) discussed the work carried out by different authors in this area and concluded that there was a need for more studies to identify the parameters that influence the service life of the constructive elements, with it being necessary to create viable mathematical relationships that allow for these methods to be applied, mainly because the deterioration of buildings does not occur uniformly since buildings are composed of several subsystems that degrade at different speeds, it can be assumed that they are composed of several layers of durability, with different service lives, other than the service life of the structure.

This dissertation seeks to provide a new breakthrough in the development and improvement in the prediction methodologies for the functional service life of existing buildings. In this sense, an advanced expert *FBSL<sub>2.0</sub>* system is extended and reviewed, specialised in the prediction of the functional service life of historical buildings. A methodology based on the theory of fuzzy sets is proposed, introduced by Lotfi A. Zadeh (1965), in or-

Zadeh (1965), con el fin de evaluar la degradación del patrimonio arquitectónico en términos de funcionalidad. Se continúa desarrollando un modelo capaz de generar un ranking de prioridades de actuación en conjuntos de edificios con similares características constructivas y que dé lugar a futuras decisiones fundadas en criterios técnicamente orientados por profesionales expertos y científicos en la materia. En la etapa final se pretende desarrollar una nueva estrategia en conservación preventiva que minimice el deterioro funcional del patrimonio cultural y que contribuya en la reducción del costo de las intervenciones. Esta herramienta podría ayudar en la toma de decisiones por parte de las administraciones públicas y privadas encargadas de la gestión de bienes inmuebles, así como en el desarrollo de planes de conservación preventiva.

Esta investigación se encuadra dentro del proyecto de investigación: "ART-RISK Inteligencia artificial aplicada a la conservación preventiva de edificios patrimoniales" financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España y los Fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER), (code: BIA2015-64878-R (MINECO/FEDER, UE)), donde se busca crear una nueva herramienta informatizada para la conservación preventiva de conjuntos de edificios patrimoniales en base a modelos de inteligencia artificial y con el fin de ponerla a disposición de los organismos y empresas dedicadas a la conservación y rehabilitación de edificios.

der to assess the degradation of architectural heritage in terms of functionality. It continues to develop a model capable of generating a ranking of priorities for action in sets of buildings with similar building characteristics and that will lead to future decisions based on technically oriented criteria from professional experts and scientists in the field. A new strategy is intended to be undertaken in the final stage, in preventive conservation to minimise the functional deterioration of cultural heritage and so that it will contribute to the reduction of the cost of the interventions. This tool could help in the decision-making by public and private administrations responsible for the management of real estate, as well as in the development of preventive conservation plans.

This research is part of a research project: "ART-RISK artificial intelligence applied to the preventive conservation of heritage buildings", funded by the Ministry of Economy and Competitiveness of the Government of Spain and the European Regional Development Fund (ERDF), (code: BIA2015-64878-R (MINECO/ERDF, EU)), where the aim is to create a new computerised tool for preventive conservation of heritage building complexes on the basis of artificial intelligence models and in order to make it available to the agencies and companies dedicated to the conservation and rehabilitation of buildings.





## **2 ESTADO DEL ARTE / STATE-OF-THE-ART**

---



## 2 Estado del arte

### 2.1 Consideraciones previas

Actualmente existe una creciente preocupación por la sostenibilidad económica y medioambiental del sector de la construcción, ya que es responsable del uso de una parte significativa de los recursos de Europa y es la principal fuente de contaminación (Balaras et al. 2005). En el siglo XXI, los edificios representan cerca del 50% de la riqueza de la mayoría de los países europeos (Long et al. 2001), por lo que la vida útil de los edificios se establece como un criterio principal esencial para la estabilidad socio-económica de las sociedades contemporáneas (Wekesa et al. 2010).

El proceso de envejecimiento natural de los materiales de construcción y sus componentes, se suele iniciar en el momento que el edificio se pone en uso (Rikey y Cotgrave 2005), esto asociado con la escasez de recursos y una falta de incipientes en la cultura del mantenimiento de los edificios, provoca la necesidad del desarrollo de políticas de conservación preventiva económicamente viables, donde se considere un procedimiento de toma de decisiones entre las partes interesadas (Howard y Pinder, 2003). Estas metodologías en el contexto del patrimonio cultural edificado se ven afectadas por diversas características, debido a problemas de decisión relacionados con la cantidad de elementos a incluir en el análisis y teniendo en cuenta consideraciones históricas, valores artísticos, restricciones económicas, impactos ambientales e incluso el alto número de representantes como arquitectos, restauradores, historiadores, promotores o propietarios que participan

## 2 State-of-the-art

### 2.1 Preliminary considerations

There is currently a growing concern for economic and environmental sustainability in the construction sector, as it is responsible for using a significant part of the resources in Europe and is the main source of pollution (Balaras et al. 2005). In the 21st century, the buildings accounted for about 50% of the wealth of most European countries (Long et al. 2011), so that the service life of buildings is established as a main essential criterion for the socio-economic stability of contemporary societies (Wekesa et al. 2010).

The natural aging process of building materials and their components, is usually initiated at the time that the building is put to use (Rikey and Cotgrave 2005), and this associated with the shortage of resources and a lack of incipient in the culture of maintenance of buildings, causes the need for the development of economically viable preventive conservation policies, where a decision-making procedure between the parties concerned is considered (Howard and Pinder, 2003). These methodologies in the context of built cultural heritage are affected by various characteristics, due to problems of decision related to the amount of elements to be included in the analysis and taking into account historical considerations, artistic values, economic constraints, environmental impacts and even the high number of actors involved in the process such as architects, restorers, historians, promoters or owners (Mazzanti, 2002).

en el proceso (Mazzanti 2002).

Por tanto, el conocimiento sobre la vida útil de los edificios y sus componentes, a pesar de ser un sistema complejo, asume un papel fundamental, permitiendo comprender cómo manejar el extenso stock construido, mediante soluciones más racionales y sostenibles (Silva et al. 2016). El interés del último tiempo en el conocimiento de la vida útil de materiales de construcción se debe principalmente a:

- Factores ambientales. La crisis energética ha dado lugar a una escasez de recursos y a una mayor concienciación en términos de sostenibilidad, atestiguando una creciente preocupación por el impacto ambiental del sector de la construcción;

- Factores económicos. La gestión y mantenimiento del stock construido es una dimensión considerablemente significativa en la economía de las sociedades del siglo XXI, que requiere de una utilización más racional de los recursos existentes (Hovde 2002).

## **2.2 Marco normativo en predicción de vida útil de edificios**

Actualmente, se pueden encontrar un cierto número de normas y directrices que pretenden establecer metodologías estandarizadas capaces de evaluar la durabilidad y la vida útil de los edificios y sus componentes.

Al final de la década de los años 70, a través del Instituto de Arquitectura de Japón se organiza una comisión técnica para sistematizar el concepto de durabilidad en la construcción.

Therefore, the knowledge about the service life of buildings and their components, despite being a complex system, assumes a fundamental role, allowing to understand how to handle the extensive built stock, through more rational and sustainable solutions (Silva et al. 2016). Latest interest in the knowledge of the service life of construction materials is mainly due to:

- Environmental factors. The energy crisis has led to a shortage of resources and to a greater awareness in terms of sustainability, witnessing a growing concern about the environmental impact of the construction sector;

- Economic factors. The management and maintenance of built stock is a considerably significant dimension in the economy of societies in the 21st century, which require a more efficient use of existing resources (Hovde 2002).

## **2.2 Regulatory framework in the prediction of the service life of buildings**

There are currently a number of rules and guidelines that aim to establish standardised methodologies able to assess the durability and service life of buildings and their components.

At the end of the 1970's, a technical committee was organised to systematise the concept of durability in construction through the Institute of Architecture in

Este proceso dio lugar a la creación del primer documento normativo sobre la durabilidad y la vida útil de servicio de los edificios y sus componentes: “*Guide for service life planning of buildings*” (AIJ 1993). La guía nipona establecía un conjunto de recomendaciones para la predicción de la vida útil de los edificios, y sus componentes o equipos, asumiendo que el final de su vida útil es determinado por el deterioro físico o la obsolescencia del mismo, esta metodología se establece como la base de los modelos factoriales. Entre otros documentos o directrices que han sido desarrollados a finales del siglo XX y dentro de la predicción de la vida útil de edificios tanto dentro como fuera de Europa caben señalar los siguientes (Rudbeck 2002; Lacasse y Sjöström 2004; Kooymas y Abbott 2006):

- En 1976 los países nórdicos (Dinamarca, Finlandia, Islandia, Noruega y Suecia) establecen un comité conjunto sobre Normas de Construcción (NKB) para el desarrollo de códigos y estándares de construcción basados en el criterio de rendimiento de los edificios.

- En 1986, se desarrolla en Dinamarca, por medio de su Comité del Fondo de Defectos de Edificios, la idea de reducir los defectos en edificios con el fin de mejorar su rendimiento;

- Las directrices desarrolladas en Los Países Bajos se toman como base para la elaboración de la Directiva Europea sobre productos de construcción.

- Más adelante en los 90, se publica la “British guide to durability of building elements, products and components” (BS 7543: 1992), normativa que enumera diferentes metodologías para la estimación de vida útil en construcción.

Japan. This process led to the creation of the first policy document on the durability and service life of buildings and their components: “*Guide for service life planning of buildings*” (AIJ 1993). The Japanese guide provided a set of recommendations for the prediction of the service life of buildings, and their components or equipment, assuming that the end of their service life is determined by their physical deterioration or obsolescence, this methodology is established as the basis of the factor models. Among other documents or guidelines that have been developed at the end of the 20th century and in the prediction of the service life of buildings, both within and outside Europe the following should be pointed out (Rudbeck 2002; Lacasse y Sjöström 2004; Kooymas and Abbott 2006):

- In 1976 the Nordic countries (Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden) established a joint committee on Construction Standards (NKB) to develop codes and standards based on the performance criterion of buildings.

- In 1986, Denmark developed the idea of reducing defects in buildings in order to improve their performance, through its Defects in Buildings Fund Committee;

- The guidelines developed in the Netherlands are taken as the basis for the development of the European Directive on construction products.

- Later in the 1990’s, the “British guide to durability of building elements, products and components” was published (BS 7543: 1992), legislation that lists different methodologies for the estimation of service life in construction.

- En Nueva Zelanda, el "New Zealand Building Code" del año 1992 (SR 1992/159), establecía la vida útil de los edificios, en función de la facilidad de acceso al elemento y la detección de defectos.

- En 1994, Noruega comienza a establecer normativas que especifican criterios asociados al desempeño de los edificios y sus componentes, como recomendaciones para llevar a cabo acciones de mantenimiento y rehabilitación de edificios (NS 3422: 1994).

- En el continente americano destacan las aportaciones de Estados Unidos a través de la Asociación para el Avance de la Tecnología en la Vivienda (PATH) y la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM), y en Canadá por el desarrollo de directrices sobre durabilidad en edificios, donde se describen las principales metodologías para la predicción de la vida útil, con la norma S478-95 (R2007).

En 2011, se presenta el estándar ISO 15686 "Building Service Life Planning", donde se definen las directrices generales y las propuestas metodológicas de predicción de vida útil. Esta normativa ha sido establecida con base en los principios desarrollados por la guía japonesa de 1993 y teniendo en cuenta las recomendaciones de la Unión Internacional de Laboratorios de Ensayos e Investigación de Materiales y Estructuras (RILEM). Además, la comisión de trabajo W080 - Predicción de la vida útil de los materiales y componentes de construcción del Consejo Internacional para la Investigación y la Innovación en la Construcción (CIB) desempeñó un papel crucial para el desarrollo de esta normativa.

- In New Zealand, the "New Zealand Building Code" of 1992 (SR 1992/159), established the service life of buildings, depending on ease of access to the element and the detection of defects.

- In 1994, Norway began to establish regulations that specify criteria associated with the performance of buildings and their components, such as recommendations for carrying out maintenance and rehabilitation of buildings (NS 3422: 1994).

- In the American continent the contributions of the United States are highlighted through the Partnership for Advancing Technology in Housing (PATH) and the American Society for Testing and Materials (ASTM), and in Canada in the development of guidelines on durability in buildings, where the main methodologies for the prediction of the service life are described, with the standard S478-95 (R2007).

In 2011, the standard ISO 15686 "Building Service Life Planning" was presented, where the general guidelines and the methodological proposals for the prediction of service life are defined. This standard has been established based on the principles developed by the Japanese guide of 1993 and taking into account the recommendations of the International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (RILEM). In addition, the work committee W080 - Prediction of the service life of the materials and components of construction of the International Council for Research and Innovation in Building (CIB) played a crucial role in the development of this policy. Currently standard ISO 15686 is

Actualmente la norma ISO 15686 es una de las fuentes de información más relevantes relacionadas con la predicción de vida útil (Sjöström y Davies 2005; Haapio y Viitaniemi 2008).

### 2.3 Vida útil y obsolescencia funcional de los edificios

En base a la normativa ISO 15686: 2011, la vida útil se establece como el tiempo transcurrido desde que el edificio se pone en servicio (después de su construcción) hasta el instante que el elemento no cumple con las condiciones o requisitos mínimos de rendimiento. En cuanto al concepto de pérdida de vida útil funcional u obsolescencia funcional el concepto de obsolescencia de un edificio se define como la incapacidad de la construcción o de alguna de sus partes para adaptarse a lo largo del tiempo a las nuevas exigencias funcionales, económicas y culturales (Sarja 2005). La obsolescencia también se puede considerar como una preocupación por parte de los propietarios y usuarios, ya que a pesar de que el edificio cumpla con los requisitos iniciales, este puede fallar en la respuesta que ofrece a las nuevas expectativas o requerimientos, especialmente en comparación con las alternativas disponibles. Independientemente de la variabilidad de los criterios de aceptación, la vida útil de los edificios se pueden distinguir en tres categorías principales: (i) vida útil física; (ii) vida útil funcional; y (iii) vida útil económica (Marteinsson 2003). La definición de cada una de ellas es la siguiente:

- La vida útil física o técnica relacionada con el deterioro de los materiales y elementos de construcción. El deterioro físico de los edificios se debe principalmente a la acción de los agentes de de-

one of the most relevant sources of information related to the prediction of service life (Sjöström and Davies 2005; Haapio 2008).

### 2.3 Service life and functional obsolescence of buildings

On the basis of ISO 15686: 2011, the service life is set as the time elapsed since the building is placed in service (after its construction) until the time that the element does not comply with the conditions or minimum performance requirements. With regard to the concept of functional loss of service life or functional obsolescence, this is defined as the inability of the construction or any of its parts to adapt over time to the new functional, economic and cultural requirements (Sarja 2005). The obsolescence can also be thought of as a concern by the owners and users, because despite the fact that the building meets the initial requirements, this may fail to answer to the new expectations or requirements, especially in comparison with available alternatives. Regardless of the variability of the acceptance criteria, the service life of the buildings can be divided into three main categories: (i) physical service life; (ii) a functional service life; and (iii) the economic service life (Marteinsson 2003). The definition of each of them is as follows:

- The physical or technical service life associated with the deterioration of the construction elements and materials. The physical deterioration of buildings is mainly due to the action of the degrada-

gradación (ya sean físicos, químicos o mecánicos) y al proceso de envejecimiento natural.

- La vida útil funcional puede considerarse como la capacidad de un edificio para realizar la función para la que fue diseñado, estando directamente relacionada con las expectativas y demandas de los propietarios; Davies y Szigeti (1999) refieren que la obsolescencia funcional de los edificios se produce cuando no se puede continuar cumpliendo con las exigencias de los usuarios, propietarios.

- Y por último, la vida útil económica; Brand (1997) afirma que la vida útil económica puede definirse como el tiempo transcurrido desde que la construcción se pone en uso hasta el momento en que se sustituye por una solución más rentable. El final de la vida útil económica se alcanza cuando el costo de reemplazar un elemento por otro es menor que el de mantener el existente. Naturalmente, con el paso del tiempo y con la aparición de nuevas soluciones constructivas más económicas, más duraderas y que requieran un menor mantenimiento, los edificios se pueden volver económicamente obsoletos. Es importante especificar que este concepto no se aplica al caso específico de la muestra analizada en este estudio, ya que se tratan de edificios de elevado valor patrimonial que no pueden ser simplemente sustituidos. En este caso particular el valor comercial no es tan fácil de calcular y no se trata sólo de un tema de rentabilidad. De esta manera, el proceso de obsolescencia de los edificios se debe principalmente a factores del siguiente tipo (Flores-Colen y de Brito 2010; Silva et al. 2016):

- a) deterioro físico;
- b) obsolescencia funcional

tion agents (whether physical, chemical or mechanical) and the natural aging process.

- The functional service life can be considered as the ability of a building to perform the function for which it was designed, and are directly related to the expectations and demands of the owners; Davies and Szigeti (1999) reported that the functional obsolescence of buildings occurs when it is not possible to continue complying with the requirements of the users, owners.

- And finally, the economic service life; Brand (1997) affirms that the economic service life can be defined as the time elapsed since the construction is put to use until such time as it is replaced by a more cost-effective solution. The end of the economic service life is reached when the cost of replacing an item by another is lower than that of maintaining the existing one. Of course, with the passage of time and the emergence of new more economic, more durable construction solutions requiring less maintenance, buildings can become economically obsolete. It is important to specify that this concept is not applicable to the specific case of the sample analysed, as in this study these are buildings of high patrimonial value that cannot be simply replaced. In this particular case the commercial value is not as easy to calculate and it is not just a question of profitability. In this way, the process of obsolescence of the buildings is mainly due to the following factors (Flores-Colen and de Brito 2010; Silva et al. 2016):

- a) physical deterioration;
- b) functional obsolescence



- c) obsolescencia económica;
- d) obsolescencia tecnológica;
- e) cambios en el contexto social;
- f) obsolescencia envolvente edificio;
- g) obsolescencia legal;
- h) obsolescencia estética;
- i) obsolescencia ambiental

En este aspecto, un estudio de 148 casos realizado por Aikivuori (1999) muestra que en sólo el 17 % de las situaciones la decisión de intervenir se toma en función del deterioro del edificio; el 44% de los casos las acciones de mantenimiento se realizan sobre la base de criterios subjetivos, el 26% se refiere a cambios de uso de la construcción, el 9% a optimización de los factores económicos y un 4% a cambios en las circunstancias de las edificaciones. Este estudio también se concluye que, cuando la decisión de intervenir se basa únicamente en criterios técnicos, dependiendo de la condición de degradación del edificio, la acción de rehabilitación tiene lugar más tarde de lo que sería si los criterios fueran subjetivos (por ejemplo, debido a los criterios estéticos) (Silva et al. 2016).

La "superposición" entre los dos conceptos parece lógico, ya que el aumento de la durabilidad y vida útil de las construcciones es un vector de actuación en la búsqueda de la sostenibilidad, para disminuir el impacto ambiental de los edificios, ya que contribuye directamente a una gestión más racional de los recursos y a la eliminación de residuos (DeSimone and Poppof 1998). En las últimas décadas, el concepto de desarrollo sostenible ha llevado incluso a una reevaluación de la contribución de la industria de la construcción en la calidad de vida (Pearce 2003). El desarrollo sostenible del sector de la construcción se puede analizar en términos de: medioambiente;

- c) economic obsolescence;
- d) technological obsolescence;
- e) changes in the social context;
- f) obsolescence of the building surround;
- g) legal obsolescence;
- h) aesthetic obsolescence;
- i) environmental obsolescence

In this regard, a study of 148 cases carried out by Aikivuori (1999) shows that in only 17 % of situations the decision to intervene is taken on the basis of the deterioration of the building; in 44% of the cases the maintenance actions are carried out on the basis of subjective criteria, 26% refer to changes of use of the construction, the 9% to optimisation of economic factors and 4% to changes in the circumstances of the buildings. This study also found that, when the decision to intervene is based solely on technical criteria, depending on the condition of degradation of the building, the rehabilitation action takes place later than it would be if the criteria were subjective (for example, due to aesthetic criteria) (Silva et al. 2016).

The "overlap" between the two concepts seems logical, since the increase in the durability and service life of the constructions is a action vector in the pursuit of sustainability, in order to reduce the environmental impact of buildings, as it contributes directly to a more rational management of resources and the elimination of waste (DeSimone and Poppof 1998). In the last decades, the concept of sustainable development has even led to a re-evaluation of the construction industry's contribution to the quality of life (Pearce 2003). The sustainable development of the construction sector can be analysed in terms of: environment; social and economic development (Mateus et

desarrollo social y económico (Mateus et al. 2008). En particular, durante la fase de uso, es sumamente importante realizar una planificación detallada de las necesidades de mantenimiento del edificio (Daniotti et al. 2008). En la misma línea, Donca et al. (2007) señalan que las acciones de mantenimiento, si se implementan y planean adecuadamente de manera técnicamente informada, permiten aumentar la vida útil de los edificios (contribuyendo así a para un adecuado desempeño de los edificios durante más tiempo y consecuentemente para una mayor durabilidad y sostenibilidad de los edificios). En la práctica, una de las maneras más eficaces de optimizar las acciones de mantenimiento en los edificios es a través del conocimiento de cómo el edificio y sus componentes se deterioran con el tiempo, estimando el instante después del cual es necesario intervenir (Talon et al. 2005). Generalmente, sin esta información se pueden generar altos costos asociados con intervenciones innecesarias o reparaciones urgentes. En este sentido, antes de implementar cualquier tipo de política de mantenimiento, se debe de evaluar el estado de conservación del elemento en cuestión y su vida útil restante, con el fin de delimitar adecuadamente la intervención a realizar (Silva et al. 2016), ya que una mejora en la comprensión de la vida útil de los edificios permitirá una gestión más racional de su mantenimiento, contribuyendo a una reducción de sus costos en todo el período de su ciclo de vida.

#### **2.4 Normativa de gestión del riesgo ISO 31000: 2011**

La norma ISO 31000 proporciona directrices para la selección y aplicación de técnicas sistemáticas que den lugar a la

al. 2008). In particular, during the use phase, it is extremely important to perform a detailed planning of the maintenance needs of the building (Daniotti et al. 2008). In the same line, Donca et al. (2007) point out that the maintenance actions, if properly planned and implemented in a technically informed manner, increase the service life of buildings (thus contributing to an adequate performance of buildings for longer and consequently for greater durability and sustainability of the buildings). In practice, one of the most effective ways to optimise the maintenance actions in buildings is through the knowledge of how the building and their components deteriorate over time, estimating the time after which it is necessary to intervene (Heel et al. 2005). Generally, high costs associated with unnecessary interventions or urgent repairs can be generated without this information. In this sense, before implementing any type of maintenance policy, the conservation status of the element in question and its remaining service life should be assessed, in order to appropriately define the intervention to be performed (Silva et al. 2016), as an improvement in the understanding of the service life of buildings will allow a more rational management of their maintenance, contributing to a reduction in costs throughout the period of their life cycle.

#### **2.4 Risk management standard ISO 31000: 2011**

Standard ISO 31000 provides guidelines for the selection and application of systematic techniques that give rise to the

apreciación del riesgo. El proceso de gestión del riesgo ayuda a tomar decisiones teniendo en cuenta la incertidumbre y la posibilidad de futuros sucesos o circunstancias (previstos o imprevistos) y sus efectos sobre los objetivos. La gestión del riesgo incluye la aplicación de métodos lógicos y sistemáticos para: comunicar y consultar a lo largo del proceso: establecer el contexto para la identificación, análisis, evaluación, tratamiento del riesgo asociado con cualquier actividad, proceso, función o producto; realizar el seguimiento y revisar los riesgos; por último informar y registrar los resultados de manera apropiada. El marco de trabajo de la gestión del riesgo proporciona las políticas, los procedimientos, y las disposiciones que permita la integración de la gestión a todos los niveles.

El Plan Nacional de Conservación Preventiva (PNCP) del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE), concebido como un documento de análisis y una herramienta de gestión, facilita la programación, implantación y coordinación de las tareas de conservación y utilización del bien cultural. Uno de los apartados más complejos en el método de trabajo para la conservación preventiva de los bienes es el análisis de riesgos y para ello los diferentes métodos existentes se basan en normas internacionales como el estándar ISO 31000, transpuesta a la normativa española por AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación) como UNE-ISO 31000: Gestión del riesgo. Principios y Directrices. Esta normativa sirve de apoyo en la gestión de riesgos directamente relacionados con las tareas de conservación preventiva y por consiguiente en las metodologías de predicción de vida útil de edificios.

appreciation of the risk. The risk management process helps make decisions taking into account the uncertainty and the possibility of future events or circumstances (planned or unplanned) and their effects on the objectives. Risk management includes the application of logical and systematic methods to: communicate and consult throughout the process: set the context for the identification, analysis, assessment, treatment of the risk associated with any activity, process, function or product; to monitor and review the risks; and finally to report and record the results in an appropriate manner. The framework of the risk management provides the policies, procedures, and the provisions that allow the integration of the management at all levels.

The National Plan of Preventive Conservation (PNCP) of the Spanish Cultural Heritage Institute (IPCE), created as an analysis document and a management tool, simplifies the programming, implementation and coordination of the conservation works and utilisation of the cultural asset. One of the most complex sections in the working method for the preventive conservation of the assets is the risk analysis and for this the different existing methods based on international standards such as standard ISO 31000, transposed into Spanish legislation by AENOR (Spanish Association for Standardisation and Certification) as *UNE-ISO 31000: Risk management* Principles and Guidelines. This standard serves as a support in risk management which is directly related to the tasks of preventive conservation and therefore on the methodologies for predicting the service life of buildings.

## 2.5 Metodologías de predicción de vida útil. Lógica difusa

Durante el siglo XXI, se han presentado diversos procedimientos y herramientas enfocadas hacia la predicción de vida útil y el proceso de toma de decisiones sobre el mantenimiento de las edificaciones. Sin embargo, todos estos modelos presentan ventajas e inconvenientes, principalmente debido a la complejidad que desempeña el modelado de los fenómenos de degradación de los edificios, tales como la calidad de los materiales, el diseño, el nivel de ejecución, las condiciones del ambiente interior y exterior, las acciones de mantenimiento (ISO 15686-1: 2011), todo esto asociado a la falta de comprensión de los mecanismos de degradación y cómo estos afectan a los elementos de construcción (Lounis et al. 1998) hace que sea un asunto muy complejo de modelar. Freitas et al. (2013) considera que en función de la problemática a modelar, la elección de la metodología puede variar en función de las ventajas y limitaciones de cada una de ellas. Por lo general, en la literatura los métodos de predicción de la vida útil se han agrupado de la siguiente manera: modelos determinísticos, estocásticos y de ingeniería (simbiosis entre las otras dos metodologías) (Lacasse y Sjöström 2004).

Silva et al. (2016) en el libro *"Methodologies for Service Life Prediction of Buildings – With a Focus on Façades Claddings"* generan una importante aportación en el ámbito de la predicción de vida útil de edificios, donde llevan a cabo el estudio de cuatro familias metodológicas (determinísticos, estocásticos, computacionales y factoriales) con su correspondiente análisis comparativo entre las distintas metodologías y su aplicabilidad

## 2.5 Methodologies for the prediction of service life. Fuzzy logic.

There have been various procedures and tools focused on the prediction of service life and the decision-making process regarding the maintenance of the buildings, during the 21st century. However, all these models have advantages and disadvantages, mainly due to the complexity of the modelling of the phenomena of degradation of the buildings, such as the quality of the materials, the design, the implementation level, the conditions of the internal and external environment, maintenance actions (ISO 15686-1: 2011), all of this is associated with a lack of understanding of the degradation mechanisms, and how these affect the construction elements (Lounis et al. 1998) makes it a very complex issue to deal with. Freitas et al. (2013) consider that on the basis of the modelling problem, the choice of the methodology may vary depending on the advantages and limitations of each one of them. Usually, in literature, the methods of prediction of service life have been grouped in the following way: stochastic and deterministic models, engineering (symbiosis between the other two methodologies) (Lacasse and Sjöström 2004).

Silva et al. (2016) in the book *"Methodologies for Service Life Prediction of Buildings - With a focus on Façades Claddings"* generate a significant contribution in the field of predicting the service life of buildings, which carry out the methodological study of four families (deterministic, stochastic, computational and factorial) with their corresponding comparative analysis between the different methodologies and their applicability to four types

a cuatro tipologías de casos de estudio (con enfoque a los revestimientos exteriores de paredes), donde muestran las ventajas y limitaciones de cada una de los sistemas utilizados. Los resultados obtenidos en esa publicación se pueden emplear para ayudar en la toma de decisiones de planificación de las acciones de mantenimiento y rehabilitación de edificios (fachadas). Además, las aplicaciones presentadas, se pueden extrapolar a otros elementos de construcción y a edificios ubicados en otros contextos ambientales, previamente se deberán de realizar las modificaciones pertinentes que den lugar a la implementación en los nuevos emplazamientos.

Los sistemas basados en lógica difusa, son conocidos por su capacidad de trabajar como aproximadores universales (Kosko 1994). Los conceptos de lógica difusa han sido aplicados exitosamente en muchas de áreas de la ingeniería y la arquitectura (Lacasse et al. 2008). Estas tipologías de modelos son especialmente interesantes cuando el problema a modelar está sujeto a un cierto nivel de incertidumbre. La aplicación extensiva de los modelos de lógica difusa se deben principalmente a su: flexibilidad, tolerancia a datos inexactos, capacidad para modelar sistemas vagos y difíciles de describir, desarrollo tomando como base la experiencia de profesionales expertos, obtención de datos a través de observaciones humanas. Por lo general, los modelos de lógica difusa tiene un mejor rendimiento y precisión que los modelos lineales clásicos (Vieira et al. 2015).

El punto de partida de los trabajos desarrollados en la presente tesis doctoral están directamente relacionados con el artículo "Modelo de predicción de la vida útil de la edificación patrimonial a partir

of case studies (with a focus on the exterior cladding of walls), which show the advantages and limitations of each of the systems used. The results obtained in this publication can be used to assist in the decision-making of action-planning of maintenance and rehabilitation of buildings (façades). In addition, the applications presented, can be extrapolated to other construction elements and buildings located in other environmental contexts, the relevant changes that give rise to the implementation in new sites must first be made.

The fuzzy logic based systems, are known for their ability to work as universal approximating factors (Kosko 1994). The concepts of fuzzy logic have been successfully applied in many areas of engineering and architecture (Lacasse 2008). These types of models are especially interesting when the problem to model is subject to a certain level of uncertainty. The extensive application of fuzzy logic models are mainly due to their flexibility, tolerance to inaccurate data, ability to model systems that are vague and difficult to describe, development on the basis of the experience of expert professionals, obtaining data through human observations. In general, the fuzzy logic models have a better performance and precision than classical linear models (Vieira et al. 2015).

The starting point for the works developed in this dissertation are directly related to the article "Prediction model of the service life of the heritage building from fuzzy logic" published by Macias Bernal

de la lógica difusa” publicado por Macías Bernal et al. (2014). En esta publicación, se buscaba un nuevo procedimiento en la determinación y valoración de los factores relacionados con la vulnerabilidad y los riesgos que afectan a los edificios. Se proponía un nuevo modelo con el fin de calcular la vida útil de construcciones patrimoniales y a partir de la teoría de los conjuntos difusos, como potente herramienta capaz de gestionar los distintos niveles de incertidumbre asociados a estos procesos de predicción. El sistema resultado de esta investigación fue denominado *Fuzzy Building Service Life – FBSL*.

et al. (2014). In this publication, a new procedure is sought in the identification and assessment of the factors related to vulnerability and the risks that affect buildings. A new model was proposed in order to calculate the life of heritage buildings and from the theory of fuzzy sets, as a powerful tool capable of managing the different levels of uncertainty associated with these prediction processes. The result arising from this investigation was called *Fuzzy Building Service Life - FBSL*.

### **3 OBJETIVOS / OBJECTIVES**

---





### 3 Objetivos

La finalidad de la presente tesis doctoral es el desarrollo y perfeccionamiento de una metodología capaz de jerarquizar acciones de intervención y mantenimiento preventivo en conjuntos homogéneos de edificios que forman parte del patrimonio histórico en distintos entornos (barrios, ciudades, comarcas, regiones). Esta información es de gran importancia porque permite mejorar el estado de conservación de los edificios durante su ciclo de vida, y al mismo tiempo, reducir los costes ambientales y económicos en las acciones de mantenimiento. De manera que racionaliza los recursos empleados, promoviendo la sostenibilidad y mejorando el estado de conservación del stock edificado y el aspecto de las ciudades. El método utilizado jerarquiza la toma de decisiones en el desarrollo de una programación que tenga como fin la conservación en el tiempo del patrimonio. En este sentido, los gestores de edificios y las partes interesadas (usuarios, propietarios) deben de utilizar criterios racionales y objetivos para establecer la periodicidad de las estrategias de mantenimiento, que son esenciales en el control de los procesos de degradación. Debido a que si se promueve la durabilidad de lo construido, y se revitaliza el valor histórico, cultural y patrimonial de las ciudades, se produce una mejora sustancial de la calidad de vida de las personas. Al interés técnico, científico y social hay que añadir el hecho de que los requisitos legales exigen actualmente que se lleven a cabo Planes Especiales de Protección de Conjuntos Históricos.

A continuación se enumeran los objetivos específicos de la investigación:

### 3 Objectives

The purpose of this dissertation is the development and refinement of a methodology able to prioritise intervention and preventive maintenance actions in homogeneous sets of buildings that form part of the historical heritage in different environments (neighbourhoods, cities, counties, regions). This information is of great importance because it allows to improve the state of preservation of the buildings during their life cycle, and at the same time, reduce environmental and economic costs in maintenance actions. In a way that streamlines the resources used, promoting sustainability and improving the state of conservation of the stock built and the appearance of cities. The method used prioritises decision-making in the development of a programming whose purpose is the conservation of the heritage in time. In this sense, building managers and stakeholders (users, owners) must use rational and objective criteria to establish the frequency of maintenance strategies, which are essential in the control of the degradation processes. Because if it promotes the durability of that built, and revitalises the historical, cultural and heritage of cities, there is a substantial improvement in the quality of life of people. To the technical, scientific and social interest must be added the fact that legislative requirements are now required to carry out Special Plans to Protect of Historical Complexes.

Listed below are the specific research objectives:

1. Revisión de un sistema experto existente con el fin de continuar profundizando en el perfeccionamiento de la herramienta para que permita la evaluación de una forma más ajustada de la vida útil funcional de edificios patrimoniales. Para ello se utiliza un modelo difuso Mamdani sustentado en 17 parámetros de entrada relacionados con los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Este estudio pretende afianzar las bases del sistema a través de los sistemas difusos como potencial herramienta para la evaluación de la vida útil en conjuntos de edificios históricos.

2. Estudio del cumplimiento por parte del sistema difuso propuesto de la normativa internacional ISO 31000:2009, principal referente en el proceso de identificación, análisis, evaluación y tratamiento de los riesgos. Esta regulación se establece en el Plan Nacional de Conservación Preventiva de España como recomendación para las estrategias de preservación del patrimonio cultural donde se propone un método de trabajo sistemático que de lugar a nuevas estrategias capaces de minimizar los efectos de los “riesgos externos” en el deterioro de los edificios históricos.

3. Aplicación teórico-práctica de la metodología propuesta con el fin de conocer la influencia de los distintos parámetros de entrada del sistema en el valor de salida. Se planteará un análisis de sensibilidad pre-configurado con el que programar situaciones extremas de las variables de riesgo y vulnerabilidad. También, se proyecta realizar nuevas aplicaciones en casos de estudio reales con los que obtener conclusiones que ayuden a la retroalimentación y mejora del modelo.

1. Review of an existing expert system in order to accurate the methodology related with the evaluation of the functional service life of heritage buildings. In this sense, a Mamdani fuzzy model, based on a set of 17 input parameters related to the concepts of vulnerability and risk, is used. This study aims to demonstrate the usefulness of the fuzzy systems as a potential tool to assess the service life in sets of historical buildings.

2. Study of compliance by the fuzzy system proposed by the international standards ISO 31000:2009, the main reference in the process of identification, analysis, evaluation, and treatment of risks. This regulation is set out in the National Plan of Preventive Conservation of Spain as a recommendation for the strategies to preserve cultural heritage where a systematic work method is proposed that leads to new strategies able to minimise the effects of the “*external risks*” in the deterioration of historic buildings.

3. Theoretical-practical application of the proposed methodology in order to determine the influence of the various input parameters of the system in the output value. A pre-configured sensitivity analysis will be considered with which to programme extreme situations of the risk and vulnerability variables. New applications are also planned in real case studies with which to obtain conclusions that will help with feedback and to improve the model.

4. Análisis del sistema de inferencia difusa mediante regresión múltiple lineal, con el objetivo de identificar las variables de entrada más relevantes estadísticamente y que tenga como fin el estableciendo de un nuevo sistema mejorado y simplificado capaz de predecir vida útil funcional.

5. Búsqueda de procedimientos que permitan la validación y comprobación del sistema FBSL2.0 a través de la correlación con otros procedimientos basados en la predicción de vida útil de edificios.

6. Estudio de registros histórico-temporales que ayuden a identificar las principales anomalías que pueden ocurrir en edificios patrimoniales, analizando sus causas relacionadas y estimando la influencia de situaciones patológicas sobre su funcionalidad a lo largo del tiempo.

Esta investigación pretende contribuir al conocimiento del estado de conservación de los edificios, permitiendo que las futuras estrategias de preservación se definan evitando costos innecesarios asociados a políticas de mantenimiento erróneas.

4. Analysis of the fuzzy inference system using multiple linear regression, with the objective of identifying the most statistically relevant input variables and with its purpose being to establish a new improved and simplified system able to predict functional service life.

5. Search for procedures that allow for the validation and checking of the FBSL<sub>2.0</sub> system through correlation with other procedures based on the prediction of the service life of buildings.

6. Study of historical-temporal records to help identify the main anomalies that can occur in heritage buildings, analysing their related causes and estimating the influence of pathological situations on their functionality over time.

This research aims to contribute to the knowledge of the state of preservation of buildings, allowing for future preservation strategies to be defined by avoiding unnecessary costs associated with erroneous maintenance policies.



## **4 METODOLOGÍA / METHODOLOGY**

---



## 4 Metodología

A continuación se exponen el conjunto de métodos que se han seguido para el desarrollo de la presente tesis doctoral, que al estar formada por un compendio de publicaciones tiene ciertas diferencias respecto de lo que podría entenderse como un capítulo metodológico clásico.

Los trabajos de investigación realizados tienen como eje común el objetivo principal de este trabajo: el desarrollo de nuevas metodologías en el ámbito de la predicción de vida útil funcional de edificios y su aplicación específica a edificios patrimoniales en el sur de España.

La estructura metodológica de esta tesis se configura a través de seis bloques temáticos:

**\* – Presentación de la metodología** (antecedentes). El sistema experto utilizado en esta tesis doctoral ha sido previamente presentado y publicado en la revista Informes de la Construcción (Macías-Bernal et al. 2014).

- - -

**A – Revisión de la modelo difuso de predicción de vida útil.** Este trabajo se basa en el estudio de la vida útil funcional en edificios patrimoniales por medio de un modelo difuso del tipo Mamdani. (Artículo I)\*

**B – Normalización del modelo mediante la normativa ISO 31000.** Se comprueba que el modelo de funcionalidad cumple con las especificaciones de la normativa internacional de gestión del riesgo ISO 31000. (Artículo II)\*

**C – Nuevas aplicaciones teóricas y prácticas.** Se han realizado distintas aplicaciones teóricas en vista a analizar la sensibilidad del modelo y además se han llevado a cabo nuevas aplicaciones prácticas en conjuntos patrimoniales. (Artículo I, II)\*

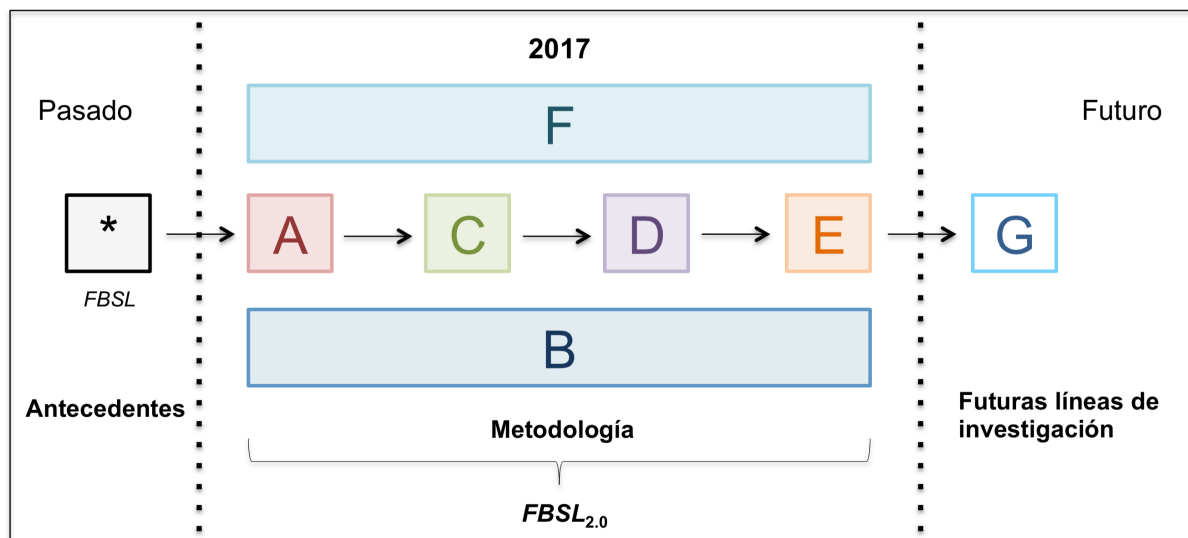
**D – Análisis de las variables del modelo a través de regresión múltiple lineal.** Esta aproximación clasifica las variables de entrada del sistema difuso en términos de la influencia que ejerce en la variable de salida – vida útil funcional. (Artículo III)\*

**E – Validación del método de predicción de vida útil funcional.** Se ha correlacionado el modelo de funcionalidad con otro sistema de predicción de vida útil física en cuatro tipologías de revestimientos de fachadas en Lisboa, Portugal. (Artículo IV, V)\*

**F – Aplicación del modelo a lo largo del tiempo. Series temporales.** Este estudio identifica las principales anomalías que pueden ocurrir los edificios patrimoniales analizados mediante en análisis previo de sus antecedentes. (Artículo VI)\*

**G – Nueva aplicación en un conjunto patrimonial nuevo.** Esta investigación intenta establecer una relación entre el nivel de funcionalidad de edificios patrimoniales y su grado de protección frente a la normativa chilena. (Artículo VII – en desarrollo)

En la Figura 4.1 se puede apreciar el esquema de encadenamiento entre los distintos trabajos parciales realizados en esta tesis y su relación con el objetivo global del trabajo, en este caso el perfeccionamiento de la metodología *FBSL* que ha dado como consecuencia un sistema difuso mejorado para la predicción de vida útil funcional en patrimonio arquitectónico y denominado *FBSL<sub>2.0</sub>*.



**Fig. 4.1.** Esquema metodológico de la tesis doctoral.

\* En el Anexo 1 de la presente tesis doctoral aparece una copia completa de los artículos (I – VI); publicaciones en las que se sustenta el trabajo.



## **5 PRINCIPALES RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

---



## 5.1 DESARROLLO MATEMÁTICO DEL MODELO DE VIDA ÚTIL FUNCIONAL

---

La investigación presentada en este módulo ha sido publicada en:

- **Prieto, A. J.**, Macías-Bernal, J. M., Chávez, M. J. and Alejandro, F. J. (2017). *Fuzzy modelling in functional service life of architectural heritage buildings*. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, 04017041. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001021.



## 5.1 Desarrollo matemático del modelo de vida útil funcional

### 5.1.1 Introducción

Cada vez hay más evidencias de que la conservación del patrimonio construido genera beneficios en múltiples de contextos urbanos. Los responsables de la toma de decisiones, instituciones y autoridades que participan en los programas de desarrollo urbano han reconocido la necesidad urgente de preservar los recursos y los bienes culturales. En el área de la construcción, se ha estimado que el 50% de todas las renovaciones de edificios en las ciudades europeas se relacionan de alguna manera u otra con la preservación del patrimonio (Comisión Europea 2000).

El objetivos de este primer apartado de los resultados es el desarrollo y perfeccionamiento de un sistema de inferencia difusa capaz de estimar la vida útil funcional en conjuntos de edificios patrimoniales, con el fin de priorizar actividades de mantenimiento y conservación entre unos edificios y otros.

La teoría de los conjuntos difusos se ha aplicado ampliamente como una herramienta de apoyo para los procesos de toma de decisiones, en distintos ámbitos dentro del campo de la ingeniería (Babuska y Verbruggen 1996; Alcalá et al. 2005; Zheng et al. 2010), y específicamente en el apoyo a la toma de decisiones para la restauración y el mantenimiento de edificios históricos (Delegou et al. 2012). Como es mencionado por Kutut et al. (2014), en la mayoría de las situaciones de la vida real, los juicios humanos son vagos y no pueden traducirse a valores numéricos, ya que el razonamiento humano y la toma de decisiones siempre están asociados con cierto grado de subjetividad. Los conjuntos difusos son capaces de manejar datos inciertos, imprecisos y vagos, que usualmente son la información disponible para modelar fenómenos del mundo real (Kahraman y Yavuz 2010; Mishra y Ghosh 2014; Vieira et al. 2015). En este estudio que pretende estimar la vida útil funcional de edificios patrimoniales necesita tratar con la incertidumbre y la vaguedad de datos asociada a la degradación funcional de los edificios, esta es la razón por la que se utiliza como herramienta los principios de la lógica difusa establecidos por Zadeh (1965) para modelar estos procesos.

A continuación se lleva a cabo la revisión de la metodología (*Fuzzy Buildings Service Life extended - FBSL<sub>2.0</sub>*) por medio de las cuatro etapas en las que se sustentan los modelos difusos: *fuzzificación, reglas de inferencia, base de conocimiento, desfuzzificación*.

## 5.1.2 Revisión del modelo matemático – *FBSL*<sub>2.0</sub>

### 5.1.2.1 Fuzzificación

Esta es la primera etapa del sistema experto (*FBSL*<sub>2.0</sub>) donde se establecen los parámetros de entrada y salida del modelo. Las variables de entrada se fuzzifican por medio de las funciones de pertenencia  $\mu_A(u)$ , donde un conjunto difuso puede tomar cualquier valor en el intervalo de [0,1], como se describe en la Ec. (5.1):

$$\mu_A(u): U \rightarrow I[0, 1] \quad (5.1)$$

El modelo se fundamenta por un total de 17 parámetros de entrada (5 de vulnerabilidad y 12 de riesgos externos) (Tabla 5.1).

**Tabla 5.1.** Variables de entrada del modelo difuso *FBSL*<sub>2.0</sub> y valoración descriptiva.

Variables de entrada	Valoración cuantitativa (min. / med. / máx.)	Valoración cualitativa (descripción)
Situación geológica	(1.0 / 2.5 / 4.0)	Condiciones del terreno óptimo / aceptable / desfavorable en términos de estabilidad del edificio.
Diseño de cubierta	(1.0 / 4.5 / 8.0)	Evacuación del agua de lluvia rápido / normal / complejo y lento.
Entorno construido	(1.0 / 4.5 / 8.0)	Edificio sin medianeras o entre complejas Construcciones a su alrededor.
Sistema constructivo	(1.0 / 4.5 / 8.0)	Características constructivas uniformes o heterogéneas.
Estado de conservación	(1.0 / 4.5 / 8.0)	Estado de conservación óptimo / normal / descuidado.
Modif. estado de cargas	(1.0 / 4.5 / 8.0)	Modificaciones simétricas y equilibradas o completamente sin ningún orden.
Sobrecargas de uso	(1.0 / 4.5 / 8.0)	Cargas vivas del edificio por debajo / igual / superior al nivel original.
Ventilación	(1.0 / 4.5 / 8.0)	Ventilación natural cruzada en todo el edificio o solo en algunas áreas.
Instalaciones	(1.0 / 4.5 / 8.0)	Todas / algunas / ningunas instalaciones están en uso y funcionan.
Fuego	(1.0 / 4.5 / 8.0)	Carga de fuego baja / media / alta en relación con la estructura.
Medioambiente interior	(1.0 / 4.5 / 8.0)	Nivel alto / medio / bajo de limpieza e higiene de los espacios.
Precipitaciones y viento	(1.0 / 4.5 / 8.0)	Área con pocas / medias / altas precipitaciones anuales.
Temperatura	(1.0 / 4.5 / 8.0)	Área con diferencias de temperatura baja / media / alta.
Incremento de población	(1.0 / 4.5 / 8.0)	Incremento de población mas del 15% / 0% / menos del 5%.
Valor patrimonial	(1.0 / 4.5 / 8.0)	Valor histórico excelente / medio / bajo.
Valor mueble	(1.0 / 4.5 / 8.0)	Apreciación valor social, cultural y litúrgico (alto / medio / bajo).
Ocupación	(1.0 / 4.5 / 8.0)	Nivel de ocupación del edificio alto / medio / bajo.

Las variables del sistema son fuzzificadas por medio de funciones de pertenencia de tipo

gaussiano, se considera que son las más apropiadas para modelar las condiciones de degradación de los edificios, ya que se puede alcanzar un valor distinto de cero en todos los puntos de la función (Ross 2010). Esto ocurre en todas las funciones de pertenencia del modelo de inferencia *fuzzy*, excepto en la variable de entrada  $v_1(\text{ubicación geológica})$ ; esta función de pertenencia es trapezoidal (una para cada tipo de terreno).

El sistema de inferencia difusa utiliza el operador difuso “y” como conector, que se define como una intersección. Por lo tanto, dados dos conjuntos  $A$  y  $B$ , definidos en sus respectivos universos de discurso  $U$ , la intersección de ambos conjuntos es un conjunto borroso  $A \wedge B$ , cuya función de pertenencia se define en las Ecs. (5.2) y (5.3).

$$\mu_{A \wedge B}(x, y) = T(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (5.2)$$

$$T(x, y) = \min(x, y) \quad (5.3)$$

donde  $T(x, y) = T\text{-norm}$  (Weber 1983) que cumple con las propiedades conmutativas, de asociatividad y monotonía [Ec. (5.3)]. En la composición de proposiciones difusas se utiliza el mínimo como conectivo (Mamdani and Assilian 1975).

#### **5.1.2.2 Base de conocimiento y reglas de inferencia**

Segunda y tercera etapa. El núcleo de un sistema difuso es la base de conocimiento, que contiene el conjunto de reglas de inferencia en lenguaje natural, así como su estructura jerárquica. Para establecer estas reglas en el modelo, se analizaron los siguientes documentos: Plan Nacional de Catedrales (1990), Código Técnico de la Edificación (2007), Ley de planeamiento de la Construcción: Método Rehabimed (2007), Ley de Ordenación de la Edificación (1999), Red de Conservación del Patrimonio (2015), UNE 41805: 2009 IN y la ISO 15686-1: 2011. Como resultado se obtuvieron un total de 17 variables de entrada (vulnerabilidades y factores de riesgo). Los inputs del modelo fueron validados por un grupo de 15 profesionales expertos en mantenimiento y preservación de edificios (Tabla 5.2). Para obtener todas las respuestas de los expertos se utilizó una metodología Delphi, por medio del software *Opina* de la Universidad de Sevilla.

El método de inferencia más significativo en lógica difusa se conoce como *modus ponens* generalizado. Cada regla difusa establece que  $\ll \text{si } x \text{ es } A, \text{ entonces } y \text{ es } B \gg$  y la observación  $\ll x \text{ es } A' \gg, \ll y \text{ es } B' \gg$  – esta conclusión se obtiene donde el conjunto borroso  $B'$

esta más próximo a  $B$ , cuando  $A'$  esta próximo al conjunto  $A$  (Zadeh 1973).

**Tabla 5.2.** Perfiles de los profesionales expertos encuestados\*.

2	Catedráticos de Universidad en Rehabilitación y Patología
2	Jefes de parque de bomberos; Madrid y Sevilla
1	Empresario de empresa constructora de rehabilitación de edificios
1	Director de laboratorio acreditado de materiales de construcción
1	Restaurador
1	Arquitecto
1	Arquitecto técnico
1	Arqueólogo
1	Jefe de conservación de edificios en Ayuntamiento capital de provincia de 700.000 hab.
1	Director de conservación de edificio Patrimonio Mundial
1	Jefe de conservación de Autoridad Portuaria
1	Director de empresa de tasación de siniestros de ámbito internacional
1	Experto en gestión de la calidad en edificación con numerosas publicaciones

\* Todos los profesionales expertos cuentan con más de 20 años de experiencia reconocida

La base de conocimiento se compone por medio del conocimiento de profesionales expertos. En la composición de las proposiciones difusas se utiliza el mecanismo de inferencia mínimo-máximo o Mamdani (Mamdani y Assilian 1975). Este tipo de métodos trabajan con el operador mínimo como función de implicación y el máximo como operador de agregación (Ross 2010).

Basado en el mecanismo de inferencia definido en la Ec. (5.4), el sistema  $FBSL_{2.0}$  se puede determinar mediante la combinación de las diferentes reglas por las que se componen la estructura del modelo.

$$\begin{aligned}
 \text{Rule (1)} &= \text{Si } x_1 \text{ es } A_1^1 \text{ Y } x_2 \text{ es } A_2^1 \dots x_n \text{ es } A_n^1 \text{ ENTONCES y es } B^1 \\
 \text{Rule (2)} &= \text{Si } x_1 \text{ es } A_1^2 \text{ Y } x_2 \text{ es } A_2^2 \dots x_n \text{ es } A_n^2 \text{ ENTONCES y es } B^2 \\
 \text{Rule (3)} &= \text{Si } x_1 \text{ es } A_1^r \text{ Y } x_2 \text{ es } A_2^r \dots x_n \text{ es } A_n^r \text{ ENTONCES y es } B^r
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Todas las reglas difusas se extraen del conocimiento, del juicio y experiencias de los expertos (Prieto et al. 2017c). Esta información se introduce en la estructura en los distintos niveles de inferencia del modelo difuso. La estructura jerárquica completa del modelo difuso se muestra en la Fig. 5.1, donde es posible observar claramente la interrelación entre las variables de entrada, intermedias y de salida del sistema. A diferencia de un sistema



experto convencional, en un sistema difuso se pueden activar simultáneamente varias reglas.

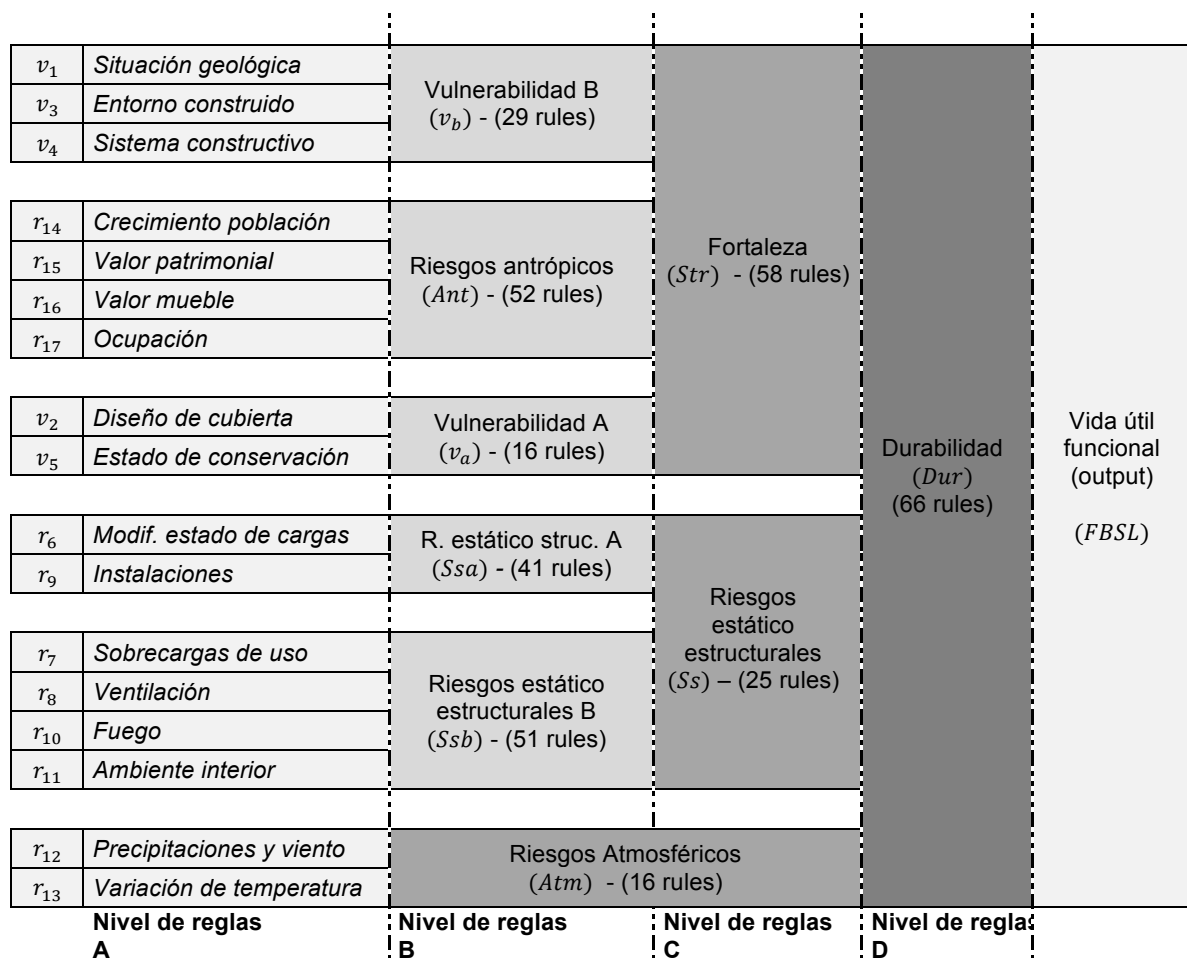


Fig. 5.1. Estructura jerárquica del sistema de inferencia difuso.

La ecuación (5.5) proporciona tres ejemplos del mecanismo de inferencia generado por los profesionales expertos involucrados en el diseño del modelo difuso y aplicado en este análisis:

Si  $v_1$  – Situación geológica es VG – Muy Bueno, Y  $v_3$  – Entorno construido es VG – Muy Bueno Y  $v_4$  – Sistema constructivo es una estimación media, ENTONCES la salida (Vulnerabilidad B ( $v_b$ )) es VG – Muy Bueno.

Si  $v_2$  – Diseño de cubierta es R – Regular, Y  $v_5$  – Estado de conservación es VG – Muy Bueno, ENTONCES la salida (Vulnerabilidad A ( $v_a$ )) es un valor intermedio entre muy bueno y regular.

Si  $r_{14}$  – Crecimiento de población es B – Malo, Y  $r_{15}$  – Valor patrimonial es VG – Muy Bueno, Y  $r_{16}$  – Valor mueble es VG – Muy bueno, Y  $r_{17}$  – Ocupación es VG – Muy bueno, ENTONCES la salida (Riesgos Antrópicos (Ant) R – Regular. (5.5)

### 5.1.2.3 Defuzzificación

Finalmente en la cuarta etapa, se describe el proceso de defuzzificación del sistema, que se utiliza para obtener un valor (nítido) como salida del modelo. Éste método funciona utilizando el centro del área (COA) del conjunto borroso B, como valor representativo,  $FBSL$ . Este método es uno de los más comunes y exitosos para procesos de defuzzificación (Moreno-Velo et al. 2007). En el caso discreto puede ser interpretado por una suma de Riemann, Ec. (5.6) (Jager et al. 1993).

$$FBSL_{2.0} = \frac{\sum_i y_i \cdot \mu_B(y_i)}{\sum_i \mu_B(y_i)} \quad (5.6)$$

Este método presenta una propiedad de continuidad, lo que significa que las funciones de pertenencia de entrada son continuas, el universo de discurso es continuo y los conjuntos difusos son definidos por funciones de pertenencia continuas, en vez de utilizar valores de pertenencia (universo discreto) (Kickert and Lemke 1976; Teodorescu 2013), lo que significa que un pequeño cambio en las entradas no implica un cambio abrupto en las salidas.

### 5.1.3 Conclusiones

El modelado de vida útil funcional está lejos de ser un asunto fácil de calcular, y por el momento si se pretender realizar un cálculo más ajustado a las condiciones reales de los edificios, éste no puede definirse por simples funciones matemáticas.

En este sentido, el modelo  $FBSL_{2.0}$  pretende ser un indicador de tendencia de la vida útil funcional de los edificios. El modelo es capaz de clasificar conjuntos de edificios con características de construcción homogéneas, proporcionando tres niveles en prioridades de intervención: a) *Upper level* – Vulnerabilidades y riesgos se consideran intolerables, se requiere intervención inmediata; b) *Middle level* “grey área” – Coste y beneficio equilibrados; c) *Lower level* - Vulnerabilidades y riesgos se consideran mínimos, no requieren ningún tipo de intervención. Esta herramienta puede ser de utilidad tanto a las administraciones

públicas como a las privadas, así como a otros tipos de empresas del sector, en el desarrollo de acciones de mantenimiento preventivo para la conservación en el tiempo del patrimonio edificado. Otra ventaja del modelo es que ha sido programado en Java pudiéndose ejecutar en cualquier plataforma, utilizando Java-Runtime-Environment (JRE) e implementado en el software *Xfuzzy3.0*.

La renovación de edificios históricos, como actividad estratégica, requiere un mecanismo integrado y nivelado de valoración y diagnóstico como primer paso, ya que el mantenimiento de edificios históricos es un tema crítico en la busca de la sostenibilidad dentro del sector de la construcción y especialmente en el continente europeo.



## 5.2 SISTEMA EXPERTO EN CUMPLIMIENTO CON LA NORMATIVA ISO 31000 DE GESTIÓN DEL RIESGO

---

La investigación presentada en este módulo ha sido publicada en:

- **Prieto, A. J.**, Macías-Bernal, J. M., Chávez, M.-J., Alejandre, F. J. (2016a). *Expert system for predicting buildings service life under ISO 31000 standard. Application in architectural heritage*. **Journal of Cultural Heritage**, 18, 209-218. DOI: 10.1016/j.culher.2015.10.006.



## **5.2 Sistema experto en cumplimiento con la normativa ISO 31000 de gestión del riesgo**

### **5.2.1 Introducción**

La normativa ISO 31000, diseñada por la Organización Internacional para la Normalización (ISO), es una poderosa herramienta aplicable a cualquier tipo de organización que participe en la implementación y mejora del procedimiento de gestión del riesgo. Este proceso facilita la toma de decisiones relacionadas con la incertidumbre o la posibilidad de eventos futuros inesperados, así como sus efectos sobre los objetivos que se pretendan conseguir; además proporciona políticas y disposiciones para la integración de la gestión del riesgo en todos los niveles de la organización. La normativa se ha desarrollado como un entendimiento común y un acuerdo efectivo para generar los pasos necesarios que den lugar a identificar, gestionar y evaluar adecuadamente el riesgo en cuestión, siendo este definido como “una combinación de consecuencias entre eventos asociados con una probabilidad considerable de ocurrencia futura” ISO 31000: 2009.

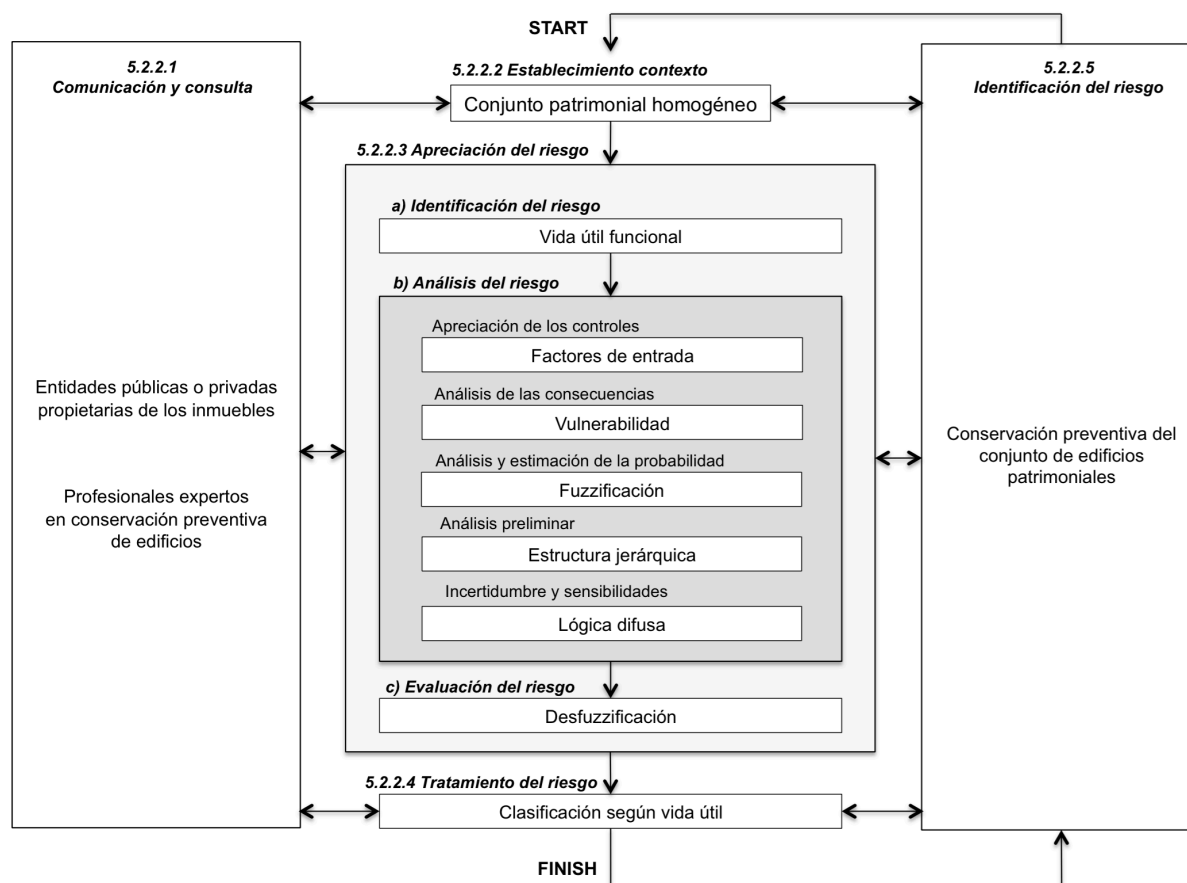
### **5.2.2 Normalización del sistema experto mediante la ISO 31000**

La normativa europea EN 31010: 2011 funciona como apoyo a la ISO 31000: 2009. La metodología de principios y directrices se establecen para ambos estándares (Fig. 5.2). La apreciación del riesgo trata de dar respuesta a las siguientes cuestiones fundamentales:

- ¿Qué puede suceder y porque (para la identificación del riesgo)?
- ¿Cuáles son las consecuencias?
- ¿Cuál es la probabilidad de su ocurrencia futura?
- ¿Existen factores que mitiguen las consecuencias del riesgo o que reduzcan la probabilidad del riesgo?
- ¿Es el nivel de riesgo tolerable o aceptable y requiere tratamiento adicional?

El sistema experto de predicción de vida útil funcional de edificios, *Fuzzy Building Service Life extended FBSL<sub>2.0</sub>*, es una aplicación computacional que contribuye en el proceso de gestión del riesgo en cuanto a la vida útil funcional de edificios, dando un nuevo paso en el ámbito de la conservación preventiva del patrimonio arquitectónico. En este sentido, se

establece un procedimiento de evaluación y análisis de la vulnerabilidad y de los principales riesgos a los que están sometidos los edificios, con el fin de gestionar la durabilidad y la vida útil de acuerdo a sus niveles de funcionalidad.



**Fig. 5.2.** Modelo *Fuzzy Building Service Life* avanzado (*FBSL<sub>2.0</sub>*) ajustado a la ISO 31000.

El estándar se ha desarrollado como un entendimiento común y un acuerdo efectivo para identificar, manejar y evaluar adecuadamente el riesgo. Las principales etapas del proceso de gestión del riesgo incluye (Fig. 5.2):

- Comunicar y consultar entre las partes interesadas a lo largo del proceso;
- Establecer el contexto;
- Identificar, analizar, evaluar y tratar el riesgo asociado;
- Realizar el seguimiento y revisión;
- Informar y registrar los resultados de manera apropiada

Este segundo apartado de los resultados de la tesis se demuestra, tras un detallado estudio y análisis de dos normativas de referencia en el campo de la gestión del riesgo, la normativa internacional ISO 31000:2009 y la normativa europea EN 31010:2011, que el siste-



ma experto *FBSL*<sub>2.0</sub> se ajusta a las especificaciones establecidas por ambas normativas (Prieto et al. 2016a). Esta investigación justifica la utilización de este método, basado en un nuevo sistema experto capaz de determinar la vida útil funcional de conjuntos de edificios patrimoniales con características constructivas homogéneas. Este proceso facilita la toma de decisiones relacionadas con la incertidumbre o la gestión de eventos futuros inesperados además de sus efectos sobre los objetivos, y también proporciona políticas, procedimientos y provisiones para la integración de la gestión del riesgo en todos los niveles de la organización. La metodología de principios y directrices se establecen para ambas normas (Fig. 5.2). El método de trabajo se articula mediante el Plan Nacional de Conservación Preventiva (PNCP) propuesto por el Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).

### **5.2.2.1 Comunicación y consulta**

En esta primera etapa del procedimiento de gestión, se establece una comunicación y consulta entre las partes interesadas: profesionales expertos en mantenimiento preventivo de edificios, entidades públicas y/o privadas, además de los propietarios de los edificios; esta actividad proporciona una retroalimentación durante toda la metodología de gestión del riesgo (Fig. 5.2). De hecho, los planes de comunicación se desarrollan garantizando los intereses entre las entidades participantes en el proceso. En esta fase se requieren de grupos interdisciplinarios que se encarguen de identificar y analizar los principales peligros involucrados en la conservación preventiva del patrimonio arquitectónico bajo análisis. De este modo, se evalúa, identifica y aborda el riesgo de pérdida de vida útil funcional en conjuntos de edificios.

### **5.2.2.2 Establecimiento del contexto**

La normativa ISO 31000 explica que al establecer el contexto se definen los parámetros básicos para la gestión y evaluación del riesgo, a saber, los objetivos y el alcance de estos parámetros, los criterios se establecen de acuerdo con la naturaleza y tipo de las consecuencias, la probabilidad de ocurrencia futura, la necesidad y la prioridad de tratamiento en función de la vida útil de cada uno de los edificios. El marco de trabajo del sistema de predicción *FBSL*<sub>2.0</sub> se basa en mantener los edificios en niveles aceptables de funcionalidad a través del tiempo. Aunque la aplicación del modelo se ha limitado a conjuntos patrimoniales con características específicas (edificios religiosos) ubicados en municipios de la provincia de Sevilla (sur de Europa), mediante el ajuste de determinados parámetros de en-

trada, el modelo sería capaz de predecir la vida útil funcional de otras tipologías de edificios y en otros contextos diferentes.

### **5.2.2.3. Proceso de apreciación del riesgo**

En esta siguiente etapa, la norma ISO 31000 desarrolla el núcleo del procedimiento que se corresponde con la apreciación de los riesgos. El sistema es capaz de analizar los edificios mas expuestos a la afección de riesgos, posteriormente se analizan consecuencias y probabilidades de ocurrencia antes de decidir una acción definitiva. Su objetivo es proporcionar evidencias basadas en el análisis de la situación para poder tomar decisiones acertadas en cuanto al tratamiento de los riesgos. Esta acción desempeña un papel clave en el proceso global de gestión, consistente en la realización de un análisis integral de los riesgos. Además hay que considerar que la evaluación no se considera como una actividad aislada, sino que está integrada con las demás actividades del proceso de gestión (Fig. 5.2).

#### **a) Identificación del riesgo**

La primera evaluación del modelo difuso, incluida en el proceso de gestión, tiene que ver con la identificación del peligro. Esta etapa de identificación depende del contexto en el que se ubica la construcción con el fin de evitar el deterioro de la arquitectura. Como resultado, se requiere un enfoque multidisciplinar en el ámbito de la cobertura de los riesgos y en un amplio rango de causas y consecuencias (vulnerabilidades), donde se pueden incluir cimentaciones, estructuras, tipos de cubierta, o la situación geológica de los edificios en cuestión (Eidsvig et al. 2014). De esta forma, es necesario identificar los eventos o situaciones que puedan afectar en la disminución de vida útil de los edificios bajo análisis, buscando como fin la prolongación en el tiempo de edificios en aceptables niveles de funcionalidad.

#### **b) Análisis del riesgo**

En base a la normativa internacional ISO 31000, el paso relacionado con el análisis del riesgo describe la actividad central del proceso de evaluación del riesgo poniendo un foco en el estudio detallado de la vida útil funcional de los edificios, por medio de cinco actividades intermedias: apreciación de los controles, estudio de las consecuencias, análisis y es-

timación de probabilidad, análisis preliminar, incertidumbres y sensibilidades (Fig. 5.2). De esta forma, se toman decisiones sobre la necesidad de tratar el riesgo a través de los medios más apropiado y teniendo en cuenta la eficacia de los controles existentes. Estos controles tienen que ver con las variables de entrada (*inputs*) de la metodología - *FBSL*<sub>2.0</sub> (Tabla 5.3). Esto se debe al hecho de que la relación de un edificio con su entorno da lugar a un complejo sistema de relaciones entre factores o variables. Por lo tanto, en una situación en la que el conocimiento disponible es impreciso o vago y la incertidumbre de los datos es alta, se pueden llevar a consultas a los profesionales expertos en la materia, permitiendo establecer métodos de “razonamiento aproximado” o “sistemas expertos” (Macías-Bernal et al. 2014).

**Tabla 5.3.** Categorías de las variables de entrada del modelo difuso *FBSL*<sub>2.0</sub>.

<b>Vulnerabilidad</b>	$V_1$	<i>Situación geológica</i>
	$V_2$	<i>Diseño de cubierta</i>
	$V_3$	<i>Entorno construido</i>
	$V_4$	<i>Sistema constructivo</i>
	$V_5$	<i>Estado de conservación</i>
<b>Riesgos estáticos-estructurales</b>	$r_6$	<i>Modif. estado de cargas</i>
	$r_7$	<i>Sobrecargas de uso</i>
	$r_8$	<i>Ventilación</i>
	$r_9$	<i>Instalaciones</i>
	$r_{10}$	<i>Fuego</i>
	$r_{11}$	<i>Medio ambiente interior</i>
<b>Riesgos atmosféricos</b>	$r_{12}$	<i>Precipitaciones</i>
	$r_{13}$	<i>Temperatura</i>
<b>Riesgos Antrópicos</b>	$r_{14}$	<i>Crecimiento de población</i>
	$r_{15}$	<i>Valor patrimonial</i>
	$r_{16}$	<i>Valor mueble</i>
	$r_{17}$	<i>Ocupación</i>

### c) Evaluación del riesgo

La evaluación del riesgo establece acciones mediante la comparación de los niveles de riesgo estimados para determinar las prioridades de tratamiento (Fig. 5.2). El modelo (*FBSL*<sub>2.0</sub>) es utilizado para obtener un ranking de prioridades de actuación a través de la estimación probabilística en términos de la funcionalidad de conjuntos arquitectónicos homogéneos. Sobre la base de lo anterior, se desarrollan tres niveles de funcionalidad:

a) Una banda superior; el nivel de riesgo se considera intolerable, tratamiento prioritario;

b) Una banda intermedia o área gris; coste y beneficio se tienen en cuenta de manera equilibrada;

c) Una banda inferior; donde el nivel de riesgo se considera insignificante o tan pequeño que no se necesitan medidas de tratamiento.

#### **5.2.2.4 Tratamiento del riesgo**

El proceso metodológico propuesto continúa con la etapa de tratamiento (Fig. 5.2), implicando la selección y acuerdo entre las probabilidades de que los riesgos relacionados con la reducción de funcionalidad en edificios se produzcan y generen otros efectos derivados de una incorrecta gestión en la conservación y mantenimiento de los edificios. Por tanto, se realiza una reevaluación crítica de la nueva situación del riesgo con el fin de evitar la degradación de los edificios, determinando su nivel de tolerancia o su tratamiento adicional en el caso de futuras situaciones similares.

#### **5.2.2.5 Seguimiento y revisión**

El sistema *FBSL*<sub>2.0</sub> es monitorizado mediante una revisión de las actividades que conforman el procedimiento de apreciación, tratamiento y evaluación con el objetivo de llevar a cabo mejoras en la metodología de gestión del riesgo. La eficiente gestión, evaluación y análisis de la vida útil funcional en conjuntos homogéneos de edificios consiste en estudiar el riesgo y su impacto potencial, proporcionando suficiente información a las partes involucradas, contribuyendo a la comprensión del riesgo y ayudando a establecer prioridades de actuación que den lugar a prevenir incidentes en la conservación preventiva de los edificios.

### **5.2.3 Conclusiones**

Como resultado de este subcapítulo, se ha establecido que el sistema de inferencia difuso cumple con las especificaciones marcadas por la normativa internacional ISO 31000: 2009 (2009), estándar de referencia en el campo de la gestión y la evaluación de riesgos aplicado a la conservación preventiva de edificios patrimoniales (Prieto et al. 2016a). La metodología se presenta como un avance en el desarrollo de estrategias de conservación que minimicen el deterioro en conjuntos patrimoniales de edificios.

## 5.3 APLICACIONES TEÓRICO-PRÁCTICAS DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE VIDA ÚTIL FUNCIONAL

---

La investigación presentada en este módulo ha sido publicada en:

- **Prieto, A. J.**, Macías-Bernal, J. M., Chávez, M. J. and Alejandre, F. J. (2017c). *Fuzzy modelling in functional service life of architectural heritage buildings*. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, 04017041. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001021.
- **Prieto, A. J.**, Macías-Bernal, J. M., Chávez, M.-J., Alejandre, F. J. (2016a). *Expert system for predicting buildings service life under ISO 31000 standard. Application in architectural heritage*. **Journal of Cultural Heritage**, 18, 209-218. DOI: 10.1016/j.culher.2015.10.006.
- **Prieto, A. J.**, Silva, A., de Brito, J., Macias-Bernal, J. M. & Alejandre, F. J. (2017b). *The influence of the pathological situations on built heritage functionality: an approach based on historical records*. **International Journal of Architectural Heritage**, 11(4), 566-587.



## 5.3 Aplicaciones teórico-prácticas del modelo de predicción de vida útil funcional

### 5.3.1 Introducción

Este subcapítulo 5.3 está organizado en dos partes principalmente: 5.3.1) una primera parte centrada en un análisis de sensibilidad del modelo donde se establece una clasificación hipotética en base a distintos niveles de funcionalidad de los edificios y 5.3.2) una segunda parte donde se muestra una nueva aplicación práctica de la metodología con un nuevo estudio de 20 casos reales.

### 5.3.2 Aplicación teórica del modelo difuso

El primer paso de la aplicación teórico-práctica pasa por un análisis de sensibilidad, intentando comprender los límites máximos y mínimos teóricos del modelo revisado, evaluando la influencia de las variables de riesgo y vulnerabilidad en la funcionalidad de los edificios analizados. Para ello, se realiza un estudio teórico, ideando inicialmente tres posibles casos de edificios hipotéticos en base a sus características de vulnerabilidad ( $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5$ ). El primer caso estudio considera un edificio (B1) con unas condiciones de vulnerabilidad óptimas (menos vulnerable). En segundo lugar el edificio (B2) presenta una vulnerabilidad en condiciones medias. Y finalmente, el tercer caso de estudio (B3) se modela con las peores características (más vulnerable);  $(B1) < (B2) < (B3)$ :

- Edificio - B1:  $v_1 = 1.0$ ;  $v_i = 1.0$  a  $i = 2, \dots, 5$  (Menos vulnerable)
- Edificio - B2:  $v_1 = 2.5$ ;  $v_i = 4.5$  a  $i = 2, \dots, 5$  (Vulnerabilidad media)
- Edificio - B3:  $v_1 = 4.0$ ;  $v_i = 8.0$  a  $i = 2, \dots, 5$  (Más vulnerable)

Posteriormente, estas tres tipologías de edificios con características de vulnerabilidad figurativa (B1, B2 y B3) han sido ubicadas en tres situaciones teóricas de riesgos externos (TR1, TR2, TR3). De esta manera, un total de nueve casuísticas posibles fueron consideradas: tres situaciones de vulnerabilidad en tres situaciones de degradación originadas por riesgos estáticos-estructurales ( $r_6, r_7, r_8, r_9, r_{10}, r_{11}$ ), riesgos atmosféricos ( $r_{12}, r_{13}$ ) y riesgos antrópicos ( $r_{14}, r_{15}, r_{16}, r_{17}$ );  $(TR1) < (TR2) < (TR3)$ :

- Riesgos Totales (TR1):  $r_j = 1.0$  a  $j = 6, \dots, 17$  ("Bajo" – impacto riesgos externos)
- Riesgos Totales (TR2):  $r_j = 4.5$  a  $j = 6, \dots, 17$  ("Medio" - impacto riesgos externos)

- Riesgos Totales (TR3):  $r_j = 8.0$  a  $j = 6, \dots, 17$  ("Alto" - impacto riesgos externos)

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.4, donde se puede observar que el modelo propuesto detecta la disminución o aumento de la vulnerabilidad inherente de los tres edificios hipotéticos (B1, B2, B3) en situaciones específicas de afección de peligros externos (RT1, RT2 y TR3). Este análisis, muestra la influencia de los agentes de degradación externa y de las condiciones de vulnerabilidad de los edificios en su condición de funcionalidad. Este análisis proporciona información útil sobre la fiabilidad del sistema propuesto. Además, se evidencia que durante la fase de diseño del sistema, se tuvo en cuenta la importancia relativa entre las diferentes variables de vulnerabilidad ( $v_{1-5}$ ) y de riesgo ( $r_{6-17}$ ) que afectan a las condiciones de los edificios, ya que el modelo  $FBSL_{2.0}$  analiza el conjunto del edificio. Este análisis se ha realizado mediante un estudio de casos teóricos, analizando los peores y los mejores escenarios posibles con el fin de observar la sensibilidad del sistema en condiciones extremas de vulnerabilidad y riesgos. Del mismo modo, se ha comprobado que el rango de niveles de funcionalidad del modelo va desde 93.0 puntos para edificios posicionados en óptimas condiciones de vulnerabilidad y riesgo hasta los 9.0 puntos para edificios en las peores casuísticas posibles (Prieto et al. 2017c).

**Tabla 5.4.** Casos de estudio sobre vulnerabilidad y riesgos externos teóricos.

Casos estudio	Variables involucradas en la vida útil funcional																	FBSL2.0
	Vulnerabilidad					Riesgos												
	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$	$v_5$	$r_6$	$r_7$	$r_8$	$r_9$	$r_{10}$	$r_{11}$	$r_{12}$	$r_{13}$	$r_{14}$	$r_{15}$	$r_{16}$	$r_{17}$	
B1 (RT1)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	93.0
B2 (RT1)	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	58.0
B3 (RT1)	4.0	8.0	8.0	8.0	8.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	27.0
B1 (RT2)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	55.0
B2 (RT2)	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	33.0
B3 (RT2)	4.0	8.0	8.0	8.0	8.0	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	19.0
B1 (RT3)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	40.0
B2 (RT3)	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	15.0
B3 (RT3)	4.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	9.0

Analizando algunos casos de la Tabla 5.4, se constata que, para el Edificio B1 (vulnerabilidad: el mejor) en la peor situación de riesgos (RT3) (riesgos: peor situación) el modelo genera una salida ( $FBSL_{2.0}$ ) de 40.0 puntos. En Prieto et al 2016b el índice de vida útil funcional es establecido como un criterio para la planificación del mantenimiento, revelando que si un edificio presente niveles inferiores a 34 puntos el sistema no garantiza su funcionali-

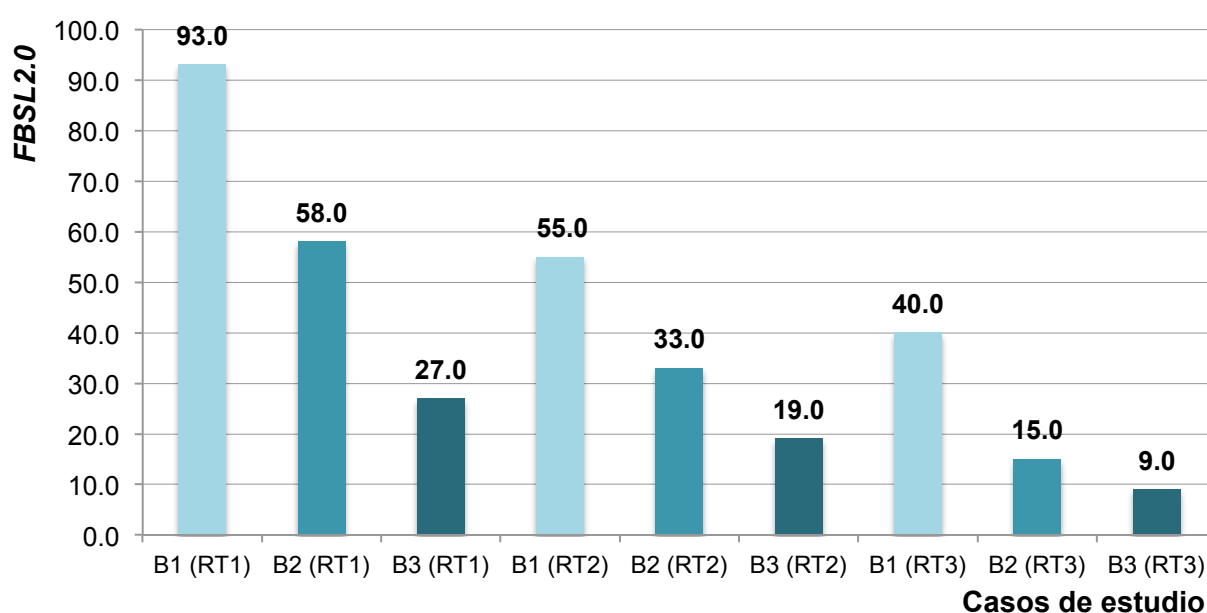


dad en aceptables condiciones, siendo necesario intervenir (i.e. proceder a una intervención de mantenimiento o rehabilitación).

Por otro lado, el Edificio B3 (vulnerabilidad: peor situación) y en la mejor situación de riesgos (RT1), conduce a una puntuación de funcionalidad está alrededor de los 27.0 puntos. Estos dos casos claramente muestran como la definición propuesta y la situación de los edificios, teniendo en cuenta su estado de conservación y las características de sus materiales de construcción, tienen una gran importancia en el desarrollo de la funcionalidad de los edificios a lo largo del tiempo, en comparación con las situaciones de riesgos externos a las que pueden estar sometidos. Las construcciones patrimoniales con altos niveles de riesgo pero con condiciones de vulnerabilidad aceptables necesitarán menos acciones de mantenimiento y conservación a lo largo de su vida útil que aquellos inmuebles ubicados en un ambiente con casi ninguna afección de riesgos externos pero presentando las peores condiciones de vulnerabilidad física (Artículo I). En la práctica, una de las maneras más eficaces de optimizar las acciones de mantenimiento en edificios es a través del conocimiento de cómo el edificio y sus componentes se deterioran con el tiempo, estimando el instante después del cual es necesario intervenir (Talon et al. 2005). Porque el edificio B1 con RT3 tiene un nivel funcional  $FBSL_{2.0}$  más alto que el edificio B3 con RT1. De manera que los edificios con mayor índice de funcionalidad, prorrogan más años la necesidad de llevar a cabo acciones de mantenimiento, por tanto, durante su ciclo de vida necesitarán un menor número de actuaciones de conservación y mantenimiento.

La Fig. 5.3 muestra claramente la evolución de la funcionalidad de los nueve edificios teóricamente diseñados en base a distintas situaciones de vulnerabilidad y riesgo, mostrando que contextos son en los que influyen en mayor o menor medida en el rendimiento del sistema ( $FBSL_{2.0}$ ). Los contextos con menor nivel de funcionalidad son aquellos que deben ser priorizados en términos de acciones de mantenimiento y conservación preventiva.

En este sentido, las prioridades de mantenimiento deben tener en cuenta la importancia cultural de cada uno de los inmuebles, sus componentes, además de su vulnerabilidad como punto de partida y sin olvidar las problemáticas funcionales muy particulares de cada edificio histórico (Dann y Wood 2004). Este trabajo pretende aportar en el desarrollo de estrategias de mantenimiento preventivo en vista de minimizar la inversión económica necesaria, ya que por lo general las intervenciones importantes en patrimonio arquitectónico suelen ser muy costosas y con un importante impacto (Watt 1999).



**Fig. 5.3.** Evolución de la vida útil funcional en base a los nueve casos de estudio teórico.

Racionalmente la mayoría de las decisiones que se toman en los programas de reconstrucción suelen ser por naturaleza muy subjetivos (Aikivuori 1999), el enfoque desarrollado en este estudio puede ayudar en la automatización de las actividades de mantenimiento disminuyendo la subjetividad y los costes futuros en el área de la construcción y contribuyendo a reducir el consumo de recursos naturales (Chai et al. 2015). Esta información resulta primordial, debido a que puede ser aplicada por las distintas partes involucradas en el sector de la construcción.

### 5.3.2 Aplicación práctica del sistema. Edificios patrimoniales en el sur de España

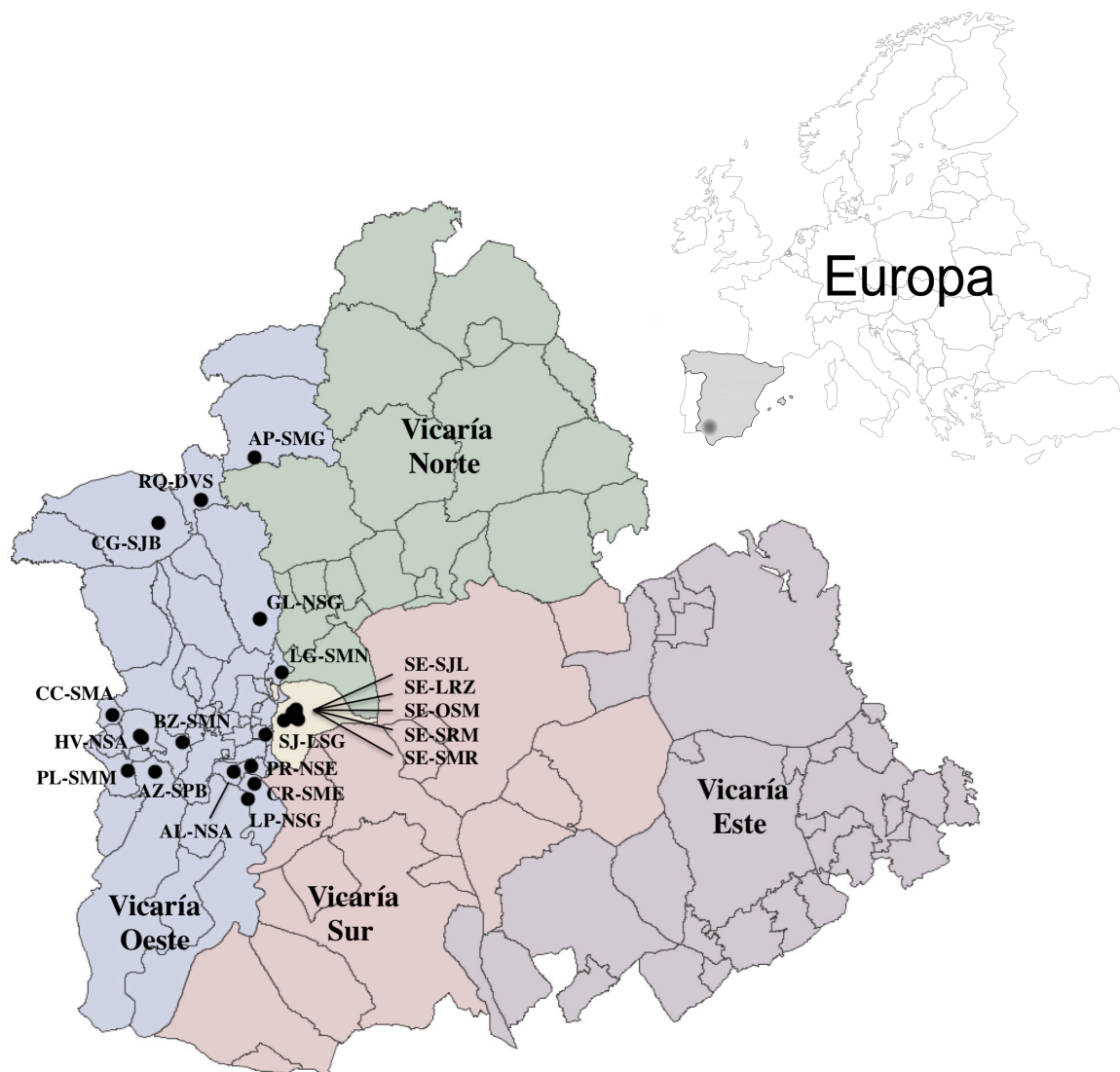
#### 5.3.2.1 Descripción de la muestra

Es muy importante comprender la diferencia entre los enfoques detallados utilizados para edificios individuales y los métodos más eficientes para el análisis a gran escala de grupos de edificios, como es el caso del estudio de esta tesis doctoral. Sin embargo, al aumentar el número de edificios y el área a evaluar, también aumentan los recursos y la cantidad de información necesaria para su gestión, por lo que es necesario homogeneizar las tipologías de las construcciones. Esto resulta necesario cuando se pretenden realizar análisis comparativos en base a la vida útil funcional de edificios y con el fin de establecer rankings de

prioridades de actuación (Prieto et al. 2016a).

### 5.3.2.2 Muestra de edificios patrimoniales situados en el sur de España

Este estudio se basa en los datos disponibles sobre el estado de conservación de 20 edificios patrimoniales ubicados en la provincia de Sevilla, que comprende un área de más de 14.000 km<sup>2</sup>. La región geográfica se extiende desde la Sierra Norte de Sevilla hasta la desembocadura del Río Guadalquivir en el Océano Atlántico (Fig. 5.4). Este territorio presenta un clima Mediterráneo cálido con una temperatura media anual de 18.5°C; los inviernos son generalmente suaves.



**Fig. 5.4.** Situación de los 20 casos de estudio en la Archidiócesis de Sevilla.

Sin embargo, en verano la temperatura a menudo puede exceder de los 40°C (Prieto et al. 2016a). Esta muestra de construcciones históricas presenta un estilo arquitectónico principalmente gótico-mudéjar, aunque también existen edificaciones con características renacentistas y barrocas. El tiempo de construcción se sitúa entre los siglos XIII y XVIII los más tardíos. La mayoría de estas iglesias fueron construidas en la Edad Media y su estilo arquitectónico fue un movimiento artístico único influenciado por elementos tanto góticos cristianos como islámicos. Estas iglesias se caracterizan morfológicamente por este dualismo estilístico: ábside abovedado gótico y un cuerpo de tres naves con techo de madera (origen árabe). Cerramientos de ladrillo que se complementan con pilares cuadrangulares u octogonales y con molduras de ladrillo elevado como decoración. Sobre estos soportes descansan arcos redondos o segmentados. Entre otros elementos de particular interés, se han añadido sucesivamente capillas funerarias a las naves laterales, que en algunas ocasiones se encuentran en las restantes secciones de las mezquitas preexistentes (Zamarreño et al. 2008). Las iglesias parroquiales consideradas en el análisis se muestran en la Fig. 5.5.

### **5.3.2.3 Caracterización constructiva de los casos de estudio**

Las 20 iglesias analizadas presentan características constructivas homogéneas. Los materiales de construcción predominantes utilizados en los monumentos analizados en la provincia de Sevilla fueron ladrillos, calizas, morteros y mármoles (Colao et al. 2010). Estos edificios de estilo gótico-mudéjar presentan estructuras con material de piedra o de mampostería, cubiertas de madera inclinada con vigas de madera horizontales y vigas articuladas, acabado de baldosas cerámicas en las zonas superiores (chapiteles de torres campanario). Ortiz y Ortiz (2016) observan que los cimientos suelen estar compuestos de zapatas continuas de ladrillo o piedra, además las columnas presentan una composición similar con los mismos materiales. Las iglesias analizadas muestran que los materiales utilizados en el sistema constructivo y en la estructura resultan ser muy similares (Fig. 5.5). No obstante también es posible encontrar otros tipos de materiales como elementos de hormigón o metal introducidos en los monumentos después de intervenciones o acciones de reacondicionamiento en los siglos XX y XXI.



1. San Pablo, Aznalcázar (AZ-SPB); 2. Sta. M<sup>a</sup> de las Nieves, Benacazón (BZ-SMN); 3. San Miguel Arcángel, Castilleja del Campo (CC-SMA); 4. Ntra. Sra. de la Asunción (Huévar del Aljarafe); 5. Sta. M<sup>a</sup> la Mayor, Pilas (PL-SMM); 6. Ntra. Sra. de la Granada, La Puebla del Río (LP-NSG); 7. Ntra. Sra. de la Estrella, Coria del Río (CR-SME); 8. Los Sagrados Corazones, San Juan de Aznalfarache (SJ-LSG); 9. Ntra. Sra. de la Estrella, Palomares del Río (PR-NSE); 10. Ntra. Sra. de la Antigua, Almenzilla (AL-NSA); 11. Ntra. Sra. de la Granada, Guillena (GL-NSG); 12. Sta. M<sup>a</sup> de Gracia, Almadén de la Plata (AP-SMG); 13. San Juan Bautista, El Castillo de las Guardas (CG-SJB); 14. Divino Salvador, El Ronquillo (RQ-DVS); 15. Sta. M<sup>a</sup> de las Nieves, La Algaba (LG-SMN); 16. San Julián, Sevilla (SE-SJL); 17. San Lorenzo, Sevilla (SE-LRZ); 18. Ómnium Sanctorum, Sevilla (SE-OSM); 19. San Román, Sevilla (SE-SRM); 20. Santa Marina, Sevilla (SE-SMR).

**Fig. 5.5.** Imágenes de la muestra de edificios patrimoniales analizados.

#### 5.3.2.4 Aplicación del modelo de vida útil funcional

Actualmente en los países europeos, existe un número cada vez mayor de propiedades o áreas protegidas debido a su interés como patrimonio cultural (Pickard y Pickerill 2002). La principal prioridad en este tipo de enfoques es minimizar los riesgos relacionados con las anomalías que influyen en el deterioro funcional del patrimonio cultural a lo largo del tiempo (Ipekoglu 2006).




El enfoque propuesto en este estudio es evaluar el nivel de funcionalidad de un conjunto de 20 edificios patrimoniales. Para llevar a cabo esta aproximación, la metodología *FBSL*<sub>2.0</sub> es capaz de clasificar las construcciones en tres condiciones de degradación funcional: “bueno”; “medio”; y “malo”. En la Tabla 5.5 es fácilmente apreciable las tres condiciones establecidas en base a los rangos que establece el sistema de predicción, asociando aproximaciones subjetivas con criterios visiblemente más cuantitativos. Por lo general la conservación preventiva implica medidas para minimizar el deterioro del patrimonio y evitando así grandes intervenciones de restauración (Cebon Lipovec y Van Balen 2008).

Profundizando un poco en el concepto del estado funcional de un edificio “bueno”, “medio / regular” o “malo” en y con base a los resultados obtenidos en este tesis doctoral, se ha podido observar lo siguiente. Solo para situaciones o eventos inusuales (como guerras, terremotos, incendios e inundaciones) los construcciones pueden alcanzar elevados o muy elevados niveles de deterioro lo que se traduce en un descenso brusco de su funcionalidad (Tabla 5.5). Ortiz et al. 2014 fundamenta esta observación, diciendo que este tipo de eventos discretos puede generar un impacto catastrófico en edificios patrimoniales. Como contraposición a estos descensos de funcionalidad, Löfsten (2000) hace referencia a que este tipo de eventos singulares inesperados vienen aparejados por aumentos significativos en los costos de conservación y mantenimiento con respecto a los últimos trabajos de mantenimiento preventivo realizados en los inmuebles. Es decir, tras estos acontecimientos se intenta recuperar el estado anterior del edificio.

La Tabla 5.6 presenta el rendimiento funcional de los 20 casos de estudio bajo análisis en este subcapítulo, mostrando sus niveles de funcionalidad actualizados a 2016. En condiciones normales de afección de riesgos externos, la vida útil funcional de los inmuebles suele variar entre niveles de “bueno” y/o “medio”.



**Tabla 5.5.** Niveles de funcionalidad de los edificios según el sistema ( $FBSL_{2.0}$ )

Nivel Funcional	Rango	Descripción	Ejemplos ilustrativos
Bueno	$100 \geq FBSL_{2.0} \geq 74$	Edificios en buenas condiciones de mantenimiento	 <p><math>FBSL = 87</math> San Miguel Arcángel Castilleja del Campo (en 2016)</p>
Medio	$74 > FBSL_{2.0} \geq 34$	El edificio requiere inspecciones periódicas, para mantener un nivel aceptable	 <p><math>FBSL = 57</math> San Juan Bautista El Castillo de las Guardas (en 2016)</p>
Malo	$34 > FBSL_{2.0} \geq 0$	Nivel de servicio inaceptable	 <p><math>FBSL = 21</math> San Julián Sevilla (en 1936)</p>

Analizando los casos de estudio más extremos (Tabla 5.6), por ejemplo (1) San Pablo de Aznalcázar o (2) Sta. M<sup>a</sup> de las Nieves de Benacazón con 91 puntos  $FBSL_{2.0}$  ambos dos presenta condiciones de funcionalidad más que aceptables y muy próximos al máximo teórico del modelo 93 puntos  $FBSL_{2.0}$ . Por otro lado, el inmueble de la muestra seleccionada con el índice funcional más bajos lo alcanza (13) la iglesia de San Juan Bautista de El Castillo de las Guardas, donde el modelo sugiere inspecciones periódicas para mantener el edificio en niveles funcionales aceptables.

La Tabla 5.6 presenta la cuantificación de las variables analizadas, para este estudio de caso. La evaluación que aparece en la Tabla 5.6, relacionada con los casos de estudio analizados, corresponde a la valoración realizada por un experto durante la inspección visual in situ, que evalúa la 17 variables de entrada del modelo. Para la toma de datos de cada uno de los inmuebles se utiliza la hoja de inspección (Fig. 5.6) para el registro de los escenarios observados por el experto en cada caso de estudio.

**Tabla 5.6.** Estudio de funcionalidad de los 20 casos de estudio actualizados a 2017.

ID	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$	$v_5$	$r_6$	$r_7$	$r_8$	$r_9$	$r_{10}$	$r_{11}$	$r_{12}$	$r_{13}$	$r_{14}$	$r_{15}$	$r_{16}$	$r_{17}$	<b>FBSL<sub>2.0</sub></b>	
1	1.0	2.8	2.5	2.3	2.3	1.8	1.5	1.8	1.8	1.8	2.0	2.5	3.0	1.8	2.0	2.0	2.0	<b>91</b>	<b>Bueno</b>
2	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.8	1.5	2.5	3.0	2.0	2.0	2.0	1.8	<b>91</b>	<b>Bueno</b>
3	1.0	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.0	2.0	2.0	2.5	3.0	2.5	2.3	2.3	3.0	<b>87</b>	<b>Bueno</b>
4	1.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.5	2.5	2.3	2.3	2.5	2.3	2.5	3.0	2.5	2.8	2.8	2.3	<b>82</b>	<b>Bueno</b>
5	1.0	2.0	2.0	2.0	2.3	2.3	2.5	2.3	2.3	2.5	2.5	2.5	3.0	2.5	1.8	1.8	2.5	<b>79</b>	<b>Bueno</b>
6	1.0	1.3	1.5	1.3	1.5	2.0	2.3	2.3	2.5	2.5	2.3	2.5	3.0	2.7	2.0	2.0	2.8	<b>82</b>	<b>Bueno</b>
7	1.0	2.3	2.3	2.3	2.0	2.5	2.3	2.3	2.5	3.5	3.0	2.5	3.0	2.7	2.5	2.5	2.5	<b>71</b>	<b>Medio</b>
8	1.0	1.8	1.8	1.8	1.5	2.3	2.0	2.0	2.5	3.0	2.3	2.5	3.0	2.2	2.0	2.0	2.5	<b>77</b>	<b>Bueno</b>
9	1.0	1.8	1.3	1.5	1.5	2.0	2.0	1.8	2.5	3.8	2.5	2.5	3.0	3.0	2.5	2.5	3.0	<b>66</b>	<b>Medio</b>
10	1.0	1.8	1.5	1.8	2.3	2.3	2.3	2.5	2.8	3.8	2.3	2.5	3.0	3.0	2.5	2.5	2.8	<b>66</b>	<b>Medio</b>
11	1.0	1.8	1.5	1.5	1.8	2.3	2.3	2.0	2.8	4.0	3.3	2.5	3.0	2.3	3.3	3.3	2.5	<b>65</b>	<b>Medio</b>
12	1.0	1.8	1.8	1.5	1.5	2.3	2.5	2.8	3.0	2.5	2.8	3.5	4.5	3.5	3.5	3.5	3.5	<b>73</b>	<b>Medio</b>
13	1.0	2.8	2.5	2.3	2.8	2.5	2.5	2.5	2.3	3.8	3.0	3.5	4.5	3.0	3.3	3.3	3.5	<b>57</b>	<b>Medio</b>
14	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	2.3	2.5	3.3	2.5	2.5	3.0	3.3	3.0	3.0	2.8	<b>72</b>	<b>Medio</b>
15	1.0	1.8	2.0	2.0	1.5	2.5	2.8	2.8	2.5	4.0	2.8	2.5	3.0	3.3	3.8	3.8	3.3	<b>66</b>	<b>Medio</b>
16	1.0	1.3	1.5	1.3	1.5	1.8	2.0	1.5	1.8	3.3	2.3	2.5	3.0	1.0	2.3	2.3	1.5	<b>80</b>	<b>Bueno</b>
17	1.0	1.5	1.8	1.8	1.5	2.3	2.3	2.5	2.5	3.3	2.8	2.5	3.0	1.0	2.3	2.3	1.5	<b>77</b>	<b>Bueno</b>
18	1.0	2.3	2.3	2.3	2.0	2.3	2.0	2.3	2.5	3.8	2.5	2.5	3.0	1.0	2.3	2.3	1.5	<b>69</b>	<b>Medio</b>
19	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.8	1.8	1.8	2.0	3.8	2.8	2.5	3.0	1.5	2.3	2.3	1.5	<b>76</b>	<b>Bueno</b>
20	1.0	1.8	1.8	1.8	1.8	2.0	2.3	2.3	2.5	3.3	2.5	2.5	3.0	1.0	2.3	2.3	1.5	<b>76</b>	<b>Bueno</b>

Teniendo en cuenta los análisis teóricos realizados sobre el sistema se puede obtener como resultado que las variables de vulnerabilidad ( $v_2$ ) - Diseño de cubierta y ( $v_5$ ) - Estado de conservación son los dos parámetros de entrada que reflejan una mayor influencia en la salida del sistema (Prieto et al. 2017d). El diseño de la cubierta es un parámetro sumamente relevante, ya que el inadecuado drenaje del agua en cubierta compromete las condiciones de conservación de todo el edificio, promoviendo su rápido deterioro. Además, debido a la afección que generan las condiciones atmosféricas, lo convierten en uno de los elementos constructivos que más se degradan y donde debería de existir una mayor atención por parte de los propietarios o usuarios del inmueble.




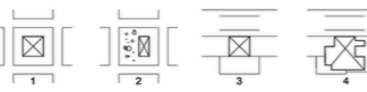

Modelo de predicción de la vida útil de un edificio: una aplicación de la lógica difusa.									
NOMBRE DEL INMUEBLE:			x.y Ficha de toma de datos.						
SITUACIÓN:		C.P.:		Nº:	Fecha:	Nº de registro:			
<b>1. DATOS GRÁFICOS</b>									
Sección longitudinal (esquema)				Fotografía 1					
Planta		Sección transversal (esquema)		Fotografía 2					
<b>2. FACTORES DE DURABILIDAD / VULNERABILIDAD</b>									
DISEÑO CUBIERTAS		CONDICIONES DEL ENTORNO		FUNCIÓN CONSTRUCTIVA					
									
1 2 3 4		1 2 3 4		1 2 3 4					
<b>3. ESTADO DE CONSERVACIÓN Y ADECUACIÓN AL USO</b>									
1. Conservación óptima   2. Conservación normal   3. Necesita conservación   4. Abandono									
	Cimentación	Estructuras	Fachadas	Estanqueidad	Instalaciones	Otros elementos			
Conservación						Valoración			
<b>4. FACTORES DE PELIGROSIDAD ESTÁTICO ESTRUCTURAL</b>									
Modif. estado cargas		Sobrecarga uso		Ventilación		Instalaciones		Fuego	
1	No se ha producido ninguna modificación	1	Sobre cargas menores al uso original	1	Ventilación nat. cruzada y permanente en todos los espacios del inmueble	1	Están todas conforme a norma y funcionamiento	1	Estructura incombustible y baja carga de fuego
2	Modificaciones equilibradas para reforzar la estructura original	2	Sobre cargas iguales al uso original	2	Ventilación natural cruzada en algunos espacios del inmueble	2	Algunas están conforme a norma y todas funcionan	2	Estructura incombustible y media carga de fuego
3	Modificaciones equilibradas de gran entidad	3	Sobrecargas de uso pasan a permanentes	3	Solo ventilación natural cruzada con el edificio en uso	3	Algunas están conforme a norma y algunas funcionan	3	Estructura combustible y baja carga de fuego
4	Modificaciones desordenadas de crecimiento orgánico	4	Sobrecargas simultáneas de varios usos	4	No ventilación cruzada en ningún caso	4	Nada está conforme a norma y no funciona	4	Estructura combustible y alta carga de fuego
<b>5. FACTORES DE PELIGROSIDAD ANTRÓPICA</b>									
Valor histórico artístico del inmueble			Valor mueble			Actividad pastoral			
1	Muy alto, BIC o protegidos		1	Muy alto, BIC o protegidos		1	Alto		
2	Alto, más de 100 años		2	Alto, obras devocionales		2	Medio		
3	Medio, normalidad		3	Medio, normalidad		3	Bajo		
4	Bajo, escasa calidad constructiva		4	Bajo, enseres cotidianos		4	Nulo		
5	Nulo, solar		5	Nulo, solar					

Fig. 5.6. Hoja de inspección para el examen visual (Macías-Bernal et al. 2014).

### **5.3.4 Conclusiones**

La renovación de los edificios históricos, como actividad estratégica, requiere como primer paso un mecanismo integrado y nivelado de valoración y diagnóstico, debido a que el mantenimiento y las intervenciones de edificios históricos son temas críticos en la reproducción de una construcción sostenible, especialmente en Europa. En este subcapítulo de resultados, se ha corroborado la aplicabilidad del sistema a un nuevo conjunto patrimonial ubicado en el suroeste de la península Ibérica. Este enfoque conduce a un paso más en el desarrollo de estrategias de tutela del patrimonio con el fin de contribuir en su conservación y mantenimiento a lo largo del tiempo. Por consiguiente, estas aproximaciones podrían ser extendidas a otras tipologías constructivas y también podrían ser ajustadas a otras regiones y contextos ambientales distintos.

## 5.4 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE ENTRADA DEL MODELO DIFUSO MEDIANTE REGRESIÓN MÚLTIPLE LINEAL

---

La investigación presentada en este módulo ha sido publicado en:

- **Prieto, A. J.**, Silva, A., de Brito, J., Macías-Bernal, J. M., Alexandre, F. J. (2017d). *Multiple linear regression and fuzzy logic models applied to the functional service life prediction of cultural heritage*. **Journal of Cultural Heritage**. DOI: 10.1016/j.culher.2017.03.004.



## 5.4 Regresión múltiple lineal en el análisis de las variables de entrada del modelo difuso

### 5.4.1 Introducción

En este capítulo se establecen modelos estadísticos y difusos para describir la vida útil funcional de edificios patrimoniales. Macías-Bernal et al. (2014) propusieron inicialmente un sistema de inferencia difusas (FIS) para modelar la vida útil funcional de edificios patrimoniales y religiosos, pertenecientes a la Archidiócesis de Sevilla, en el suroeste de España. Esta metodología ha sido aplicada y mejorada por Prieto et al. (2016a) y Prieto et al. (2016b) con la intención de proporcionar una clasificación de prioridades de las acciones de mantenimiento basado en el rendimiento de los casos de estudio. Este método a pesar de permitir eficientemente la clasificación de las necesidades de mantenimiento en edificios históricos, es relativamente complejo, requiriendo el conocimiento del sistema de inferencia *fuzzy* (establecido a partir de una encuesta a expertos (Prieto et al. 2017c)) y la aplicación de un software específico.

En este subcapítulo de la presente tesis doctoral se pretende aportar en este campo mediante el perfeccionamiento de la metodología propuesta previamente en el subcapítulo 5.1, estableciendo un nuevo método que simplifica la estimación de funcionalidad de edificios. En este sentido, se hace uso de un análisis de regresión múltiple lineal (MLR) para describir un modelo simplificado en vista de predecir la vida útil funcional del patrimonio edificado, identificando las variables que más contribuyen a los fenómenos de degradación funcional de los edificios religiosos. Para ello, se examinó una muestra de 100 iglesias parroquiales (con características constructivas homogéneas pero con diferentes niveles de funcionalidad). Estos modelos ayudarán a los responsables de la toma de decisiones a desarrollar la estrategia más apropiada para el uso futuro de los edificios patrimoniales, considerando los factores más relevantes involucrados y aplicando estrategias eficientes de mantenimiento.

### 5.4.2 Descripción del modelo difuso y de los casos de estudio

El modelo difuso ha sido expuesto previamente en el subcapítulo 5.1 (Prieto et al. 2017c), donde se desarrolla detenidamente las principales características de la metodología *fuzzy*. En cuanto a la caracterización de los casos de estudio, edificios históricos ubicados en el

suroeste de la península ibérica y propiedad de la Archidiócesis de Sevilla, también han sido detallados previamente en el subcapítulo 5.3, apartado 2 (Prieto et al. 2017b) en el que se lleva a cabo la aplicación práctica del modelo en un conjunto homogéneo de 20 templos parroquiales.

### 5.4.3 Aplicación de la regresión múltiple lineal para identificar los parámetros relevantes en el mantenimiento de edificios patrimoniales

El análisis de regresión es uno de los métodos más utilizados para medir la relación entre dos o más variables (Moy et al. 2014), para predecir así el comportamiento de una variable dependiente o endógena, según una o más variables independientes o explicativas. La regresión múltiple lineal se utiliza frecuentemente como un modelo empírico o función aproximada, lo que permite establecer un modelo matemático para describir un fenómeno del mundo real (Montgomery et al. 2001). Generalmente, la relación entre las variables dependientes e independientes presentan una relación similar a la que aparece en la Ec. (5.7) (Silva et al. 2012).

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_p x_{pi} + \varepsilon_i \quad (5.7)$$

donde  $y_i$  es la variable dependiente;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{pi}$  son los coeficientes de regresión,  $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{pi}$ , son las variables independientes y  $\varepsilon_i$  los errores aleatorios del modelo. Los coeficientes de regresión lineal ( $B$ ) se obtienen por el método de los mínimos cuadrados.

Recientemente, varios estudios (Silva et al. 2012; Silva et al. 2013; Silva et al. 2016) abordan la aplicación de esta técnica estadística para la predicción de la vida útil de los revestimientos y como una herramienta de apoyo para las tomas decisiones en mantenimiento. En este trabajo se hace uso de un análisis de regresión múltiple lineal (RML) para modelar la funcionalidad del patrimonio construido, proponiendo un nuevo modelo, que funciona como una simplificación del modelo  $FBSL_{2.0}$ , reduciendo así la complejidad del mismo y el número de variables incluidas, permitiendo su aplicación práctica por las partes interesadas en el sector.

Por tanto, la primera etapa de la definición del modelo RML es la identificación de las variables que contribuyen a la explicación de la variable independiente, es decir la funcionalidad de los edificios patrimoniales. Como ha sido mencionado por Martin et al. (1996), un

método eficiente de predicción de la vida útil debería ser capaz de definir las variables más relevantes. En este estudio, se aplica una práctica escalonada con la intención de identificar cuáles son las variables más significativas. En este método, sólo se incluyen las variables independientes estadísticamente significativas, analizando todas las hipótesis de la regresión, eliminando así los efectos de multicolinealidad, es decir variables pseudo-independientes que están interrelacionadas, poniendo en peligro el análisis de regresión múltiple (Leung et al. 2001). En el procedimiento paso a paso, las variables independientes fueron introducidas en el modelo desde la variable más significativa, con un alto impacto en el coeficiente de determinación del modelo ( $R^2$ ), a la variables con menos relevancia (Leung et al. 2001). Para la definición de los modelos RML se ha utilizado el software SPSS (*Statistical Package for Social Sciences*).

En la definición del modelo MLR, el índice de funcionalidad se considera la variable dependiente, analizando el resto de las 17 variables de entrada del modelo difuso (FIS). Ec. (5.8) presenta el modelo de RML obtenido, permitiendo predecir la funcionalidad de los edificios patrimoniales según 11 variables explicativas consideradas.

$$FBSL_{2,0} = -1.902v_1 - 3.396v_2 - 0.629v_3 - 1.160v_4 - 3.376v_5 - 2.173r_7 - 2.297r_{10} - 1.318r_{12} - 1.286r_{14} - 1.531r_{15} - 1.077r_{17} + 115.257 \quad (5.8)$$

donde  $v_1$  es la situación geológica,  $v_2$  diseño de la cubierta,  $v_3$  condiciones del entorno construido,  $v_4$  sistema constructivo,  $v_5$  estado de conservación,  $r_7$  sobrecargas de uso,  $r_{10}$  riesgo de fuego,  $r_{12}$  exposición a la lluvia,  $r_{14}$  incremento de población,  $r_{15}$  valor patrimonial and  $r_{17}$  condiciones de ocupación. Para aplicar el modelo, las variables explicativas deben ser reemplazadas por su valor numérico. Las variables han sido expuestas inicialmente en los subcapítulos de resultados 5.1 y 5.2.

Este modelo presenta un coeficiente de correlación y determinación de 0.960 y 0.923, respectivamente; revelando así una correlación muy fuerte entre el  $FBSL_{2,0}$  y el valor obtenido mediante regresión múltiple lineal. El coeficiente de determinación obtenido revela que el 92,3% de la variabilidad del sistema  $FBSL_{2,0}$  puede explicarse por las 11 variables incluidas, mientras que el 7,7% restante se debe a otras causas, las cuáles no han sido consideradas bajo análisis en este estudio.

El modelo presenta una fuerte correlación entre el  $FBSL_{2.0}$  calculado y los valores obtenidos por el sistema de inferencia difusa (FIS) (basado en las condiciones reales de las iglesias inspeccionadas), de acuerdo con la encuesta a expertos realizada. Sin embargo, el modelo propuesto es aun relativamente complejo, con un extenso número de predictores. Por lo tanto, se propone un modelo simplificado, más fácil de aplicar en la práctica, con sólo seis variables. El modelo reducido se ha establecido asegurando que el nuevo modelo es capaz de representar adecuadamente el índice de funcionalidad de las iglesias bajo análisis y no implica una reducción en la precisión del modelo de RML global superior al 5%. El principal inconveniente del modelo simplificado es que, como suele ocurrir con el modelado matemático, la simplificación del modelo conduce a una ligera reducción de su precisión (Prieto et al. 2017d).

Este segundo modelo abreviado muestra una correlación muy fuerte entre el índice de funcionalidad previsto y el observado, lo que revela que el 89,9% de la variabilidad de la funcionalidad de las iglesias analizadas puede explicarse por las seis variables incluidas en el modelo. Ec. (5.9) presenta la ecuación numérica de la relación entre el índice  $FBSL_{2.0}$  y las variables explicativas.

$$FBSL_{2.0} = -3.954v_2 - 2.247v_3 - 3.076v_5 - 3.241r_7 - 1.876r_{14} - 2.675r_{17} + 109.320 \quad (5.9)$$

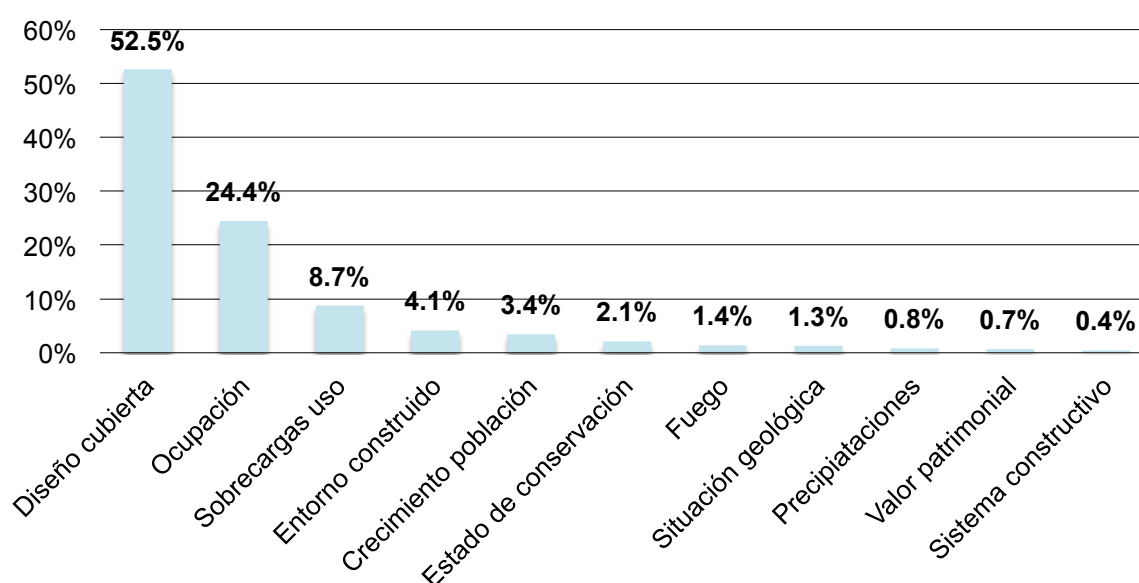
donde  $v_2$  es el diseño de la cubierta,  $v_3$  son las condiciones del entorno construido,  $v_5$  es el estado de conservación,  $r_7$  son las sobrecargas de uso,  $r_{14}$  incremento de población,  $r_{17}$  condiciones de ocupación. Para la aplicación del modelo simplificado, las variables explicativas deben ser reemplazadas por su valor numérico.

La Fig. 5.7 presenta el peso de las distintas variables utilizadas en la definición de la variabilidad de la capacidad de servicio de los edificios analizados. A la izquierda se analiza el peso relativo de las 11 variables consideradas en el modelo MLR general y en la Fig. 5.8 se analizan las variables incluidas en el modelo simplificado. Las Fig. 5.7 y 5.8 muestran para ambos modelos la importancia relativa de cada variable en la estimación de la variabilidad del índice de funcionalidad de los edificios históricos analizados. Para los modelos de regresión múltiple lineal, el diseño de la cubierta es la variable más relevante, lo que explica por sí mismo más del 50% en la variación del *output* del sistema (exactamente el 52% para el modelo con 11 variables y el 55% para el modelo con seis variables) ya que en muy frecuente que la decisiones de intervención se basan exclusivamente en la condicione de

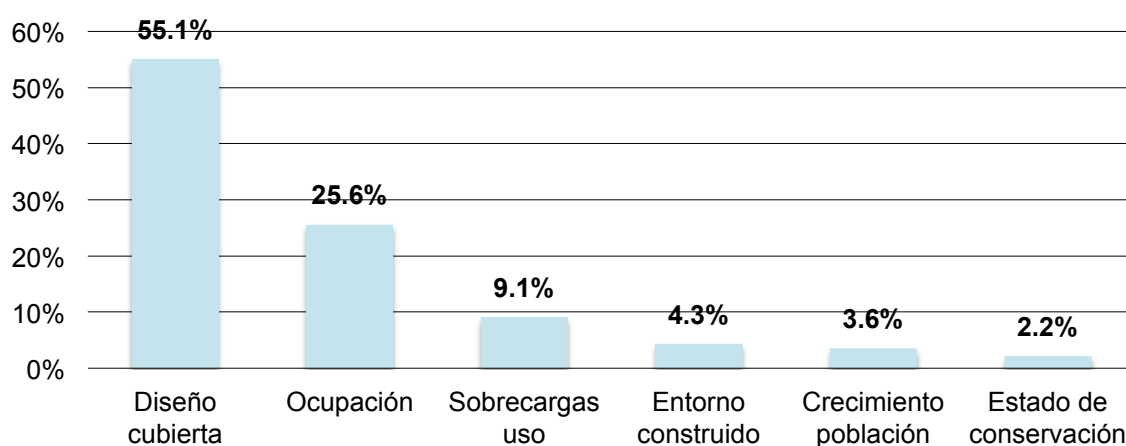


degradación de cubierta. En los modelos propuestos, la ocupación también es un parámetro muy relevante, seguido por las cargas vivas, las condiciones ambientales, el crecimiento de población y las condiciones de conservación del edificio en si.

Los métodos simplificados del modelo difuso inicial presentado en este estudio permiten evaluar la funcionalidad de las iglesias analizadas. Esta metodología considera las consecuencias de las condiciones ambientales, estáticas-estructurales y las condiciones antropogénicas sobre la vida útil funcional del patrimonio cultural (dada por el índice de funcionalidad –  $FBSL_{2.0}$ ). La aplicación del modelo implica el conocimiento sobre el sistema de inferencia de lógica difusa adoptado, así como el uso de la aplicación computacional o el *software* de modelo difuso desarrollado. Este modelo es más complejo pero también más preciso, abarcando todas las variables más relevantes. Por lo tanto, los modelos propuestos por el modelo de RML permiten simplificar el modelo difuso, estimando el nivel de funcionalidad y la clasificación de las necesidades de mantenimiento de los edificios analizados aplicando una ecuación simple, fácilmente aplicable por las diferentes partes implicadas (gestores, diseñadores, arquitectos, constructores, ingenieros, entre otros), sin necesidad de conocimientos especializados sobre sistemas de inferencia difusos o software complejos. Necesariamente, la ganancia en la simplicidad conduce a una pérdida en la precisión del modelo, aunque, tal como lo mencionan diferentes autores (Tolman and Tolman 2003; Bordalo et al. 2011), las decisiones que se deben tomar en las acciones de mantenimiento que afectan al patrimonio edificado debe ser asistido por herramientas fáciles de usar que puedan ser fácilmente aplicadas por las partes interesadas. (Artículo III)



**Fig. 5.7.** Peso relativo de las variables incluidas en el modelo global de 11 variables.



**Fig. 5.8.** Peso relativo de las variables incluidas en el modelo simplificado de 6 variables.

Respecto al ranking de las actividades de mantenimiento y restauración, Prieto et al. (2016b) propone una escala numérica para correlacionar el índice  $FBSL_{2.0}$  y el tiempo hasta la siguiente acción de mantenimiento.

Adoptando estos criterios, una iglesia con un índice  $FBSL_{2.0}$  por debajo de los 34 puntos, el inmueble requiere una intervención inmediata, y el modelo no garantiza la funcionalidad del edificio en niveles aceptables; en la muestra analizada, 23 iglesias requieren una intervención inmediata según el modelo de lógica difusa, y el modelo RML con 11 variables identifican correctamente el 91% (21 de los estudios de caso) que realmente requieren intervención inmediata. El modelo simplificado con sólo seis variables además de ser más simple, pierde cierta precisión, sólo identificando correctamente el 74% de los estudios de casos que requieren intervención inmediata. En el otro lado de la escala jerárquica, hay 20 iglesias un estado de conservación muy bueno, y por tanto no requieren intervenciones en los próximos 50 años. Ambos modelos de RML identifican correctamente el 90% de estos estudios de casos. Por lo tanto, aunque los modelos de RML no son perfectos, los resultados revelan que ambos modelos presentan altos niveles de precisión y un comportamiento adecuado en la descripción de un fenómeno complejo tal y como es la predicción de las condiciones de funcionalidad de los edificios patrimoniales.

#### 5.4.4 Conclusiones

Este subcapítulo de la tesis doctoral se ha desarrollado un instrumento básico para predecir la vida útil funcional de edificios en su conjunto en condiciones de degradación y con fines orientados al mantenimiento preventivo. Los modelos y resultados obtenidos pueden

ser muy útiles en la gestión y organización de actividades preventivas de mantenimiento en edificios, teniendo en cuenta las necesidades financieras, sociales y medioambientales, ya que el patrimonio edificado es un asunto de gran relevancia en términos de la preservación de la cultura de las sociedades actuales.

En este estudio se ha determinado la vida útil funcional de 100 iglesias ubicadas en la región de Andalucía (provincia de Sevilla, suroeste de España) a partir de un sistema de inferencia difusa (FIS). También se propone un modelo simplificado basado en un análisis de regresión múltiple lineal, más sencillo y fácil de aplicar en situaciones prácticas, lo que permite identificar las principales variables que influyen en la funcionalidad de las iglesias analizadas.

Los modelos propuestos permiten obtener resultados coherentes y precisos, mostrando una fuerte correlación entre los valores observados (basado en la opinión de profesionales expertos) y los valores previstos por los modelos propuestos. En este estudio, se ha comprobado que la variable de diseño de cubierta ( $v_2$ ) es la más relevante para la definición del final de la vida útil funcional de las iglesias analizadas. La ocupación, las cargas vivas, las condiciones ambientales, el crecimiento de la población y el estado de conservación son también variables relevantes. Como era de esperar, las más vulnerables y sometidas a mayores riesgos presentan índices de funcionalidad más bajos, lo que requiere un gran número de intervenciones a lo largo del tiempo para garantizar su preservación a lo largo del tiempo.

Las metodologías propuestas pretenden ser herramientas sencillas y rentables para determinar la vida útil funcional de los monumentos en toda una región, estableciendo una priorización de las operaciones de mantenimiento en grupos de monumentos con características constructivas similares tratando de centrar la atención en los edificios con menor funcionalidad ( $FBSL_{2.0} < 34$  puntos, que requieren mayores esfuerzos de conservación e intervenciones urgentes). En este sentido y con el fin de asegurar la adecuada y exacta aplicación del sistema de inferencia difusa se recomienda realizar una nueva encuesta de profesionales expertos con el fin de adaptar algunas de las variables al nuevo contexto en el que se pretenda aplicar la metodología.



## 5.5 REGISTROS HISTÓRICO-TEMPORALES EN EL ESTUDIO DE LA VIDA ÚTIL FUNCIONAL DE EDIFICIOS PATRIMONIALES

---

La investigación presentada en este módulo ha sido publicada en:

- **Prieto, A. J.**, Silva, A., de Brito, J., Macías-Bernal, J. M. & Alejandre, F. J. (2017b). *The influence of the pathological situations on built heritage functionality: an approach based on historical records*. **International Journal of Architectural Heritage**, 11(4), 566-587.



## **5.5 Registros histórico-temporales en el estudio de la vida útil funcional de edificios patrimoniales**

### **5.5.1 Introducción**

Este capítulo identifica las principales anomalías que deben ocurrir en edificios patrimoniales, analizando sus causas relacionadas, y estimando la influencia de las situaciones patológicas en la vida útil funcional de los edificios. Esta información es esencial para apoyar intervenciones de rehabilitación cualificadas y sostenibles en conjuntos homogéneos de edificios. Se ha utilizado el sistema difuso *FBSL<sub>2.0</sub>* para estimar la capacidad de servicio de los edificios, este trabajo se ha llevado a cabo por medio de la utilización de registros histórico-temporales recuperados desde que los monumentos fueron construidos hasta la actualidad. Además, se ha evaluado la influencia de las posibles situaciones patológicas con el fin de definir las acciones de rehabilitación más adecuadas.

La utilización de datos históricos permite conocer el anterior comportamiento funcional de los edificios. Estos datos pueden proporcionar información de gran utilidad en la definición de planes de mantenimiento preventivo, considerando los requerimientos financieros, sociales y ambientales así como sus anomalías más frecuentes. Para ello, se han recopilado un total de 390 registros históricos en una muestra de 20 iglesias parroquiales ubicadas en el suroeste de España. En este estudio se han analizado los efectos de las anomalías más comunes, concluyendo que el control de la humedad y las anomalías relacionadas con la madera en cubierta son las áreas cruciales de los edificios en busca de asegurar su capacidad funcional en el tiempo.

### **5.5.2 Principales anomalías en edificios patrimoniales**

Para normalizar los informes y los archivos de inspección en la muestra de edificios se ha considera como esencial la utilización de un sistema de clasificación de las anomalías que podrían ocurrir en estos edificios. La sistematización de las anomalías detectadas se basa en una extensa revisión de la literatura, caracterizando los principales elementos: E1 - Albañilería (Athmani et al. 2015; Lordsleem 2016); E2- Elementos de madera (Delgado et al. 2013); E3 - Cubiertas (Walter et al. 2005, Garcez et al. 2012a; b); E4 - Cimentaciones (Poulos 2016, Carretero-Ayuso et al. 2015); E5 - Morteros y revestimientos (Flores-Colen

et al. 2008, Neto y de Brito 2012, Sá et al. 2014, Silvestre y de Brito 2009).

### 5.5.3 Datos históricos

Para llevar a cabo este trabajo se han recogido manualmente una elevada cantidad de datos histórico-temporales de los archivos parroquiales de la Archidiócesis de Sevilla y de una empresa especializada en el sector de la construcción (Archivos de la Archidiócesis de Sevilla 2016). Los datos incorporan: entrevistas, documentos, planes estratégicos de la organización, informes anuales, encuestas y archivos relacionados con presupuestos. Además estos datos incluyen, en algunos de los casos, entrevistas semi-estructuradas con los principales interesados (responsables de las operaciones de mantenimiento). Las observaciones de campo permiten una comprensión más profunda del entorno construido, los recursos históricos y las condiciones de la propiedad en si (Prieto et al. 2017b).

Los datos obtenidos abarcan información histórica de los edificios relacionada con diferentes tipos de intervenciones desde el siglo XIII hasta el siglo XXI (Prieto, Macías-Bernal y Chávez 2015). Basado en 390 registros obtenidos en 20 iglesias, este estudio analiza las situaciones patológicas de los inmuebles de acuerdo a sus elementos principales (cimientos, elementos de madera, cubierta, morteros y revestimientos, elementos de mampostería).

Los registros de datos históricos permiten evaluar su desempeño funcional a lo largo del tiempo. Recientemente, Prieto et al. (2016c; 2017e) han aplicado el FIS (*FBSL<sub>2.0</sub>*) y el método Delphi para obtener resultados cuantitativos, a partir de datos cualitativos. Este enfoque proporciona datos de salida sobre la condición de funcionalidad de cada edificio en cada momento en el que existe disponibilidad de registros de información suficiente. El método Delphi es utilizado para eliminar la subjetividad asociada con la opinión de expertos, estableciendo una metodología de evaluación del tipo *Fuzzy Delphi Method* (FDM) que cuantifica efectivamente la vida útil de los edificios a lo largo del tiempo. Esta información es crucial para la definición de futuros planes de conservación preventiva en conjuntos de edificios patrimoniales (Carter y Bramley 2002). Analizando los datos recopilados (390 registros), se han podido obtener los siguientes resultados:

- Entre los datos recogidos se han podido identificar sólo dos acontecimientos catastróficos: a) el Terremoto de Lisboa de (1755) y b) la Guerra Civil Española (1936-39).



Tras eventos desastrosos, las iglesias presentan niveles funcionales inaceptables ( $< 34$  puntos  $FBSL_{2.0}$ ), debido a fallos producidos en los edificios de manera generalizada. Por tanto, se recomienda una intervención correctiva urgente.

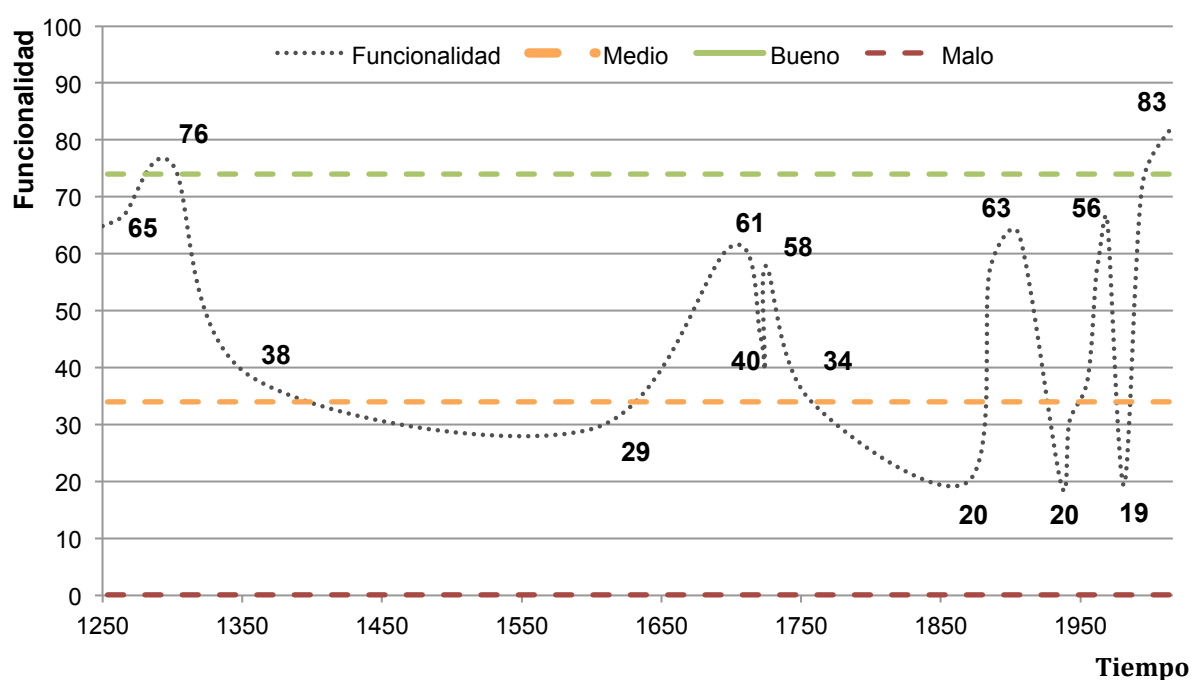
- Las partes interesadas suelen reconocer la importancia de recuperar el patrimonio edificado después de un cataclismo, ya que en el 85% de los casos, los tiempo de las acciones de reacondicionamientos después de un evento desastroso fue de 1 a 20 años y sólo en 3 de los casos analizados la rehabilitación se produjo 45 años después del evento desastroso.
- En condiciones normales, el índice de funcionalidad de los edificios analizados varía entre “bueno” y “medio”. En estas condiciones, a menudo no es posible preveer el período en que se realizan acciones de mantenimiento, lo que demuestra que estas acciones se llevan a cabo, por regla general, debido a criterios subjetivos. Como indican Flores-Colen et al. (2010), las actuaciones de mantenimiento se basan, muchas veces, en criterios programáticos influenciados por la percepción de los usuarios y las limitaciones económicas del momento.

### **5.5.4 Aplicación de la metodología a un estudio de caso: Templo parroquial de Santa Marina (Sevilla)**

A continuación, se analiza un caso de estudio en particular para ilustrar la evaluación de la vida útil funcional de los edificios y su posible patología durante un período de tiempo. El siguiente ejemplo presenta el estudio detallado de una determinada parroquia, a partir de los registros históricos recuperados desde el siglo XIII hasta 2016/2017. Durante la fase de recuperación de datos de la iglesia de Santa Marina, se han recuperado un total de 23 registros histórico-temporales.

La Figura 5.9 muestra la evolución del nivel de funcionalidad de la iglesia de Santa Marina. Se han examinado cuatro eventos especialmente catastróficos con desastrosas consecuencias en el desempeño del edificio: (i) el primero ocurrió en el siglo XIV, debido al terremoto de 1356, localizado en los alrededores del cabo de San Vicente, lo que afectó al edificio; (ii) la segunda, ocurrida en el siglo XVIII (1755 Terremoto de Lisboa); (iii) la tercera ocurrió en 1936 (primera mitad del siglo XX), durante la Guerra Civil Española el templo fue incendiado; y (iv) finalmente, el cuarto acontecimiento ocurrió en 1981 (segunda mitad del siglo XX), correspondiente a la destrucción de gran parte del edificio debido a un nuevo incendio. (Prieto et al. 2017d)

En cuanto a la evolución del desempeño de la iglesia (Tabla 5.7 y Fig. 5.9). Se han considerado los datos acumulados de los registros históricos de la iglesia de Santa Marina. Los datos de archivo almacenados (Vigil-Escalera 1991) mencionan que: *El edificio fue quemado en 1936, durante la década del 60 se llevaron a cabo diversas campañas de restauración (refuerzo de bóvedas y arcos, techos y reconstrucción de elementos de mampostería). En 1973, la iglesia estaba de nuevo abierta al público. Sin embargo, permaneció cerrada sin acciones de mantenimiento durante casi diez años, incluso sufrió saqueos de muchos de los elementos que se almacenaban en su interior. En 1981, la sufre otro incendio la cubierta fue completamente destruida. El edificio no contaba con ningún tipo de sistema de detección o protección contra incendios. Entre 1981 y 1994, se realizó la reconstrucción de la iglesia. Durante este período, en 1984, los trabajos de emergencia ocurrieron principalmente para limpiar la vegetación parasitaria de las cubiertas, y breves reparaciones. En 1987 la iglesia se reabrió después de un nuevo proyecto de restauración; en 1989 se realizó la reconstrucción del techo artesonado de la nave central así como la reparación de las cubiertas y en la torre; finalmente, en 1994 se finalizaron las obras de reconstrucción.*



**Fig. 5.9.** Vida útil funcional a través del tiempo en la iglesia de Sta. Marina, Sevilla.

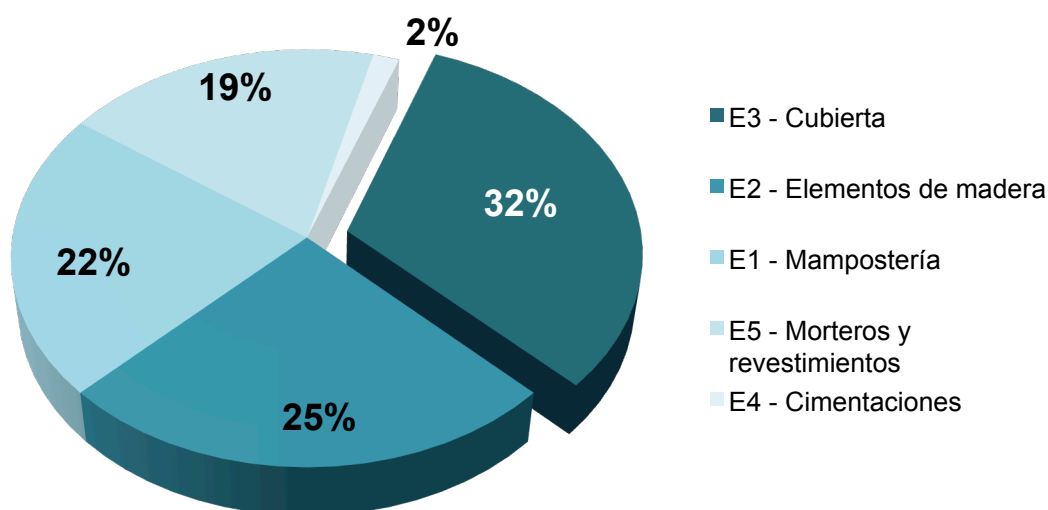
En la Tabla 5.7 se presenta la cuantificación de las variables introducidas en el sistema difuso, que se definieron a partir del análisis de series temporales de los datos históricos recopilados, que proporcionan información relevante sobre las vulnerabilidades y riesgos

del edificio a lo largo de su ciclo de vida. Esta cuantificación se basa en un sistema de conocimiento experto, como se describe en este estudio. Cuando los expertos profesionales, que están analizando los datos históricos y cuantificando las variables de entrada, no pueden encontrar registros relacionados con el estado de conservación del edificio, deben evaluar el edificio considerando una situación promedio. En este estudio de caso, algunas variables de entrada se consideran con el mismo valor durante el período de tiempo considerado –  $v_1$ ,  $r_{12}$  y  $r_{13}$  – ya que la ubicación geológica ( $v_1$ ) sigue siendo la misma durante el tiempo, así como los riesgos atmosféricos, que son considerados en un nivel medio, ya que el edificio se encuentra en un clima mediterráneo (con condiciones meteorológicas moderadas). Después del análisis de los registros históricos, la cubierta de este templo se muestra como uno de los elementos constructivos más vulnerables, condicionando las acciones de mantenimiento realizadas, o en otras palabras, las acciones de mantenimiento se realizan principalmente para reparar y restaurar la cubierta de la iglesia.

r9	1725	Trabajos de mantenimiento.	1	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3
r10	1755	El terremoto de Lisboa causó grietas y fallas que condujeron a reparar el daño causado.	1	6	4	4	6	4	4	4	4	4	4	3
r11	1869	Las cubiertas de las naves desaparecen debido a un incendio. Edificio presenta mal estado de conservación.	1	8	4	4	6	4	7	4	5	4	5	3
r12	1885	Se emprenden nuevos trabajos de restauración en la capilla de la Piedad.	1	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	3
r13	1906	Se reconstruye la capilla bautismal.	1	2	3	3	2	3	3	3	4	4	4	3
r14	1936	Incendio. Se pierden los retablos y las cubiertas de las naves.	1	7	6	6	7	5	5	5	6	6	4	3
r15	1942	Se comienza a erigir el edificio siguiendo el patrón gótico original.	1	6	6	6	6	4	4	4	5	4	4	3
r16	1955	Aparece una grieta vertical en el encuentro entre la torre y el cerramiento.	1	5	5	5	5	4	4	4	4	4	3	3
r17	1961	Se consideran obras de conservación y restauración en las paredes interiores y en fachadas.	1	3	3	3	3	4	4	4	4	4	3	3
r18	1963	Obras de mantenimiento en la fachada norte.	1	3	3	3	2	4	4	4	4	4	3	3
r19	1969	Continúan los trabajos de mantenimiento en la fachada norte.	1	3	2	2	2	3	3	3	3	4	3	3
r20	1981	Incendio.	1	8	7	7	7	5	5	5	6	7	4	3
r21	1994	Reconstrucción del edificio terminada.	1	2	2	2	2	2	2	2	3	4	3	3
r22	2016	Estado actual de conservación	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3

Los informes históricos consultados revelan que la cubierta de iglesias es el elemento constructivo más relevante (no solo en el caso de estudio detallado, sino también en toda la muestra). El *Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics* de Francia, después de un análisis de 12.000 anomalías, concluyó que los techos presentan más problemas patológicos que la mayoría de los elementos constructivos. Un estudio similar realizado recientemente en Australia también concluyó que los techos son uno de los elementos más afectados por las situaciones patológicas y donde se observó un mayor número de anomalías (Ilozor et al. 2004). La aparición de anomalías en los tejados suele provocar problemas estructurales en el propio techo y en el resto del edificio e incluso puede generar daños en los bienes muebles internos (Garcez et al. 2012a). En este sentido, las anomalías asociadas con la humedad son las más frecuentes en la muestra de casos, ocurrida en el 75% de las iglesias analizadas, durante el período de tiempo analizado. (Prieto et al. 2017d).

Con base en la muestra analizada y en los datos temporales, se constata que la mayor parte de las anomalías detectadas ocurren en los elementos de cubierta (32%), seguidos de anomalías en elementos de madera (25%), anomalías en mampostería (22%), morteros y revestimientos (19%), y finalmente en las cimentaciones (2%) (Fig. 5.10). En la muestra considerada, las anomalías más comúnmente detectadas son: acumulación de residuos y suciedad superficial; colonización biológica; eflorescencias o carbonatación; agrietamiento / fracturas; desmoronamiento / desintegración / desagregación; degradación de las características mecánicas; deformación, hinchazón u otras deficiencias de planeidad. Estas anomalías afectan entre el 50% y el 60% de todos los casos de estudio analizados.



**Fig. 5.10.** Frecuencia de las anomalías en los elementos constructivos de edificios históricos, en base a los 390 registros de las 20 iglesias analizadas.

La eflorescencia es el defecto más común detectado en paredes y revestimientos, debido esencialmente a la elevación de los fenómenos de humedad por capilaridad del terreno. Las fisuras y fracturas se detectan generalmente en las cubiertas de madera, causado por acciones ambientales y falta de mantenimiento. El techo es uno de los elementos más vulnerables, mostrando la mayor incidencia de anomalías y siendo responsable de la mayoría de las decisiones de intervención. La situaciones de humedad se identifica como la principal causa de problemas patológicos en edificios patrimoniales de estas características y es un factor ambiental determinante en el proceso de degradación.

### **5.5.5 Conclusiones**

Exitosos planes de mantenimiento sólo pueden lograrse mediante el análisis de las situaciones patológicas de los edificios patrimoniales analizados, identificando los elementos que requieren intervención, racionalización de los recursos y de los fondos económicos, evitando procesos repetitivos de tipo placebo que no resuelven en la mayoría de las situaciones el problema inicial. Por tanto, es fundamental definir herramientas precisas, que puedan ser utilizadas por todos los actores involucrados en las distintas etapas y niveles de actividad, para establecer rutinas integradas de mantenimiento (incluyendo inspecciones periódicas, obras preventivas y acciones de conservación y rehabilitación).

Este enfoque permite comprender en mejor medida los puntos débiles de este tipo de edificios, los cuáles deben ser cuidadosamente analizados durante periódicas inspecciones. Este análisis de datos puede ser capaz de demostrar la utilidad de identificar el período óptimo de tiempo para acometer acciones de mantenimiento preventivo, reduciendo así los costes durante el ciclo de vida de los edificios.

## 5.6 VALIDACIÓN DEL SISTEMA $FBSL_{2.0}$ DE PREDICCIÓN DE VIDA ÚTIL FUNCIONAL CON EL MODELO DE DEGRADACIÓN FÍSICA ( $S_w$ )

---

La investigación presentada en este módulo ha sido publicada en:

- **Prieto, A. J.**, Silva, A., de Brito, J., & Alejandro, F. J. (2016b). *Functional and Physical Service Life of Natural Stone Claddings*. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 28(12), 04016150. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001663.
- **Prieto, A. J.**, Silva, A., de Brito, J., & Macias-Bernal, J. M. (2017a). *Serviceability of facade claddings*. **Building Research & Information**, 1-12. DOI: 10.1080/09613218.2016.1264808.

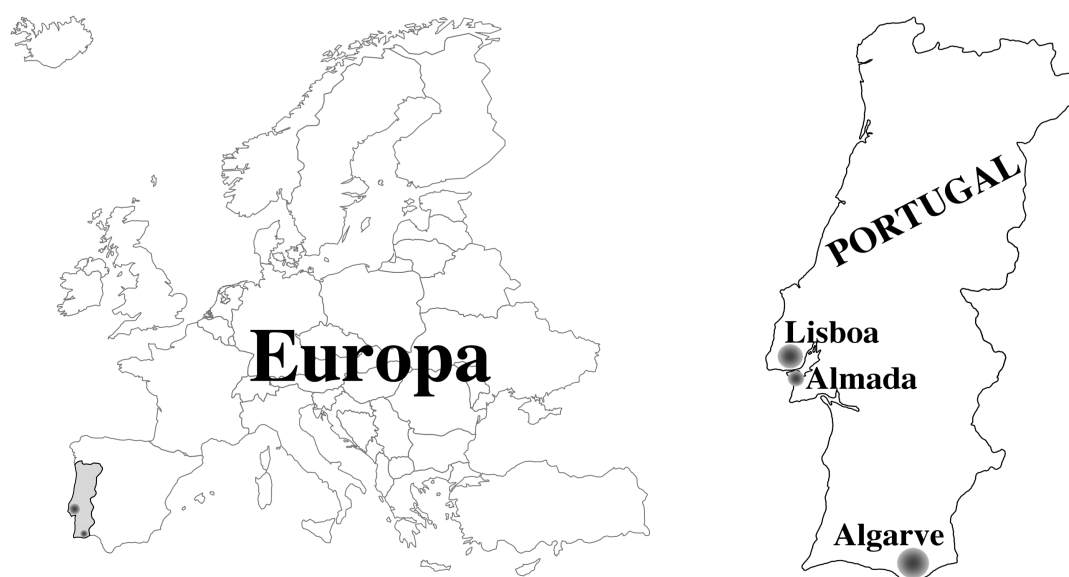




## 5.6 Validación del sistema de vida útil funcional $FBSL_{2.0}$ con el modelo de degradación física ( $S_w$ )

### 5.6. Introducción

En este subcapítulo 5.6, se establece una correlación entre dos métodos para predecir la vida útil funcional y física de los edificios y sus componentes. La aplicación de ambos métodos se basa en la valoración del estado de degradación y la funcionalidad de 203 revestimiento de fachadas de piedra natural, 183 revestimientos cerámicos, 177 pinturas y 84 de revocos. Los casos de estudio están localizados en Portugal (sur-oeste de Europa) en las ciudades de Lisboa, Almada, y en la región de Algarve en el sur de Portugal (Fig. 5.11). En estos casos de estudio no se han incluido edificios patrimoniales, el inmueble más antiguo data del año 1891 y el más reciente en 2014.



**Fig. 5.11.** Situación de los sistemas constructivos de fachadas analizados en Portugal (Lisboa, Almada y la región de Algarve).

El conjunto de casos de estudio al encontrarse en el suroeste de la península ibérica está expuesto a las siguientes condiciones climáticas (Silva et al. 2014):

- Con respecto a las orientación de los edificios, el norte es más húmedo y frío; una orientación occidental es más propensa a los vientos predominantes (que llevan sales marinas), con mayores probabilidades de simultanear viento y lluvia.

- Orientaciones hacia el sur experimentan una mayor exposición solar, lo que afecta a la durabilidad de los revestimientos. Sin embargo, depende del tipo de revestimiento. La exposición solar y el mayor gradiente térmico afecta más a cerámicos y pinturas y no es tan relevante para revestimientos de piedra natural (ésta es más afectada por la humedad y el viento).
- Los estudios de casos están expuestos a temperaturas anuales entre 15.0 y 17.5°C.
- Lisboa y Almada tienen precipitaciones anuales entre 400 y 600 mm; en la región del Algarve, la incidencia media anual de precipitaciones es inferior a la de Lisboa y Almada.
- La mayor parte de la muestra cuenta con una humedad relativa media anual entre 70% y 75%.

Con este resultado se pretende conocer la evolución de la degradación en relación con la funcionalidad de estos revestimientos a lo largo del tiempo e identificar la utilidad de relacionar estas dos características. Las condiciones de funcionalidad y de degradación de las fachadas analizadas se evalúan a través de inspecciones visuales. La vulnerabilidad y los riesgos se consideran en la evaluación de ambos métodos, como factores que afectan a la vida útil física y funcional de los edificios. Estos modelos se implementan en base a la opinión de profesionales expertos en la materia. El estudio ha permitido establecer una escala jerárquica sobre prioridades de intervención entre los revestimientos de piedra natural, cerámicos, pinturas y revocos teniendo en cuenta criterios físicos y funcionales. Esta información es extremadamente importante en la implementación de programas de mantenimiento en grandes conjuntos de edificios.

### **5.6.2 Modelo de predicción de la vida útil física – $S_w$**

La metodología para la predicción de la vida útil física se basa en una evaluación visual sistemática de la degradación de una muestra significativa de fachadas con diferentes edades y características. La evaluación comprende el estudio de los defectos y la recopilación de datos cuantitativos y cualitativos sobre las dimensiones de las fachadas; las áreas afectadas por defectos; el nivel de degradación asociado con cada tipo de defecto; y los factores de degradación de cada fachada para el posterior análisis de su influencia.

El modelo de predicción de vida útil propuesto por Gaspar y de Brito (2011) contiene un índice cuantitativo que representa el desempeño global de cualquier elemento de construc-

ción. Este índice numérico, designado severidad de degradación  $S_w$ , se obtiene como la relación entre el grado de degradación de la fachada, ponderado en función del nivel de degradación y la gravedad de los defectos, y un área de referencia equivalente a la extensión teórica máxima de la degradación de la fachada bajo análisis (Ec. 5.10).

$$S_w = \frac{\sum (A_n \times k_n \times k_{a,n})}{A \cdot \sum (k_{max.})} \quad (5.10)$$

donde ( $S_w$ ), es la severidad de degradación, expresando el nivel global de degradación de la fachada como un porcentaje;  $A_n$  es el área de revestimiento afectado por un defecto  $n$ , en  $m^2$ ;  $k_n$  es el factor multiplicador 'n' de la anomalía, como una función de su nivel de degradación (entre 0 y 4);  $k_{a,n}$  es el coeficiente de ponderación correspondiente a la importancia relativa de cada anomalía ( $k_{a,n} \in ]0, +\infty [$ );  $A$  es el área total del revestimiento, en  $m^2$ ; y  $\sum (k_{max.})$  es la suma de los factores de ponderación para el nivel de degradación más alto de cada tipo de defecto en un revestimiento con un área igual a  $A$ .

Diversos autores han establecido sistemas de clasificación de las anomalías o escalas de degradación con el fin de expresar la degradación visual y funcional de los elementos analizados (Shohet et al. 1999; Brandt y Rasmussen 2002; Gaspar y de Brito 2008; Silva et al. 2016). Estos sistemas consisten en la clasificación de las anomalías a través de una escala de variables discretas que varían desde el nivel de condición más favorables (situaciones de ausencia de degradación visible) a la situación más desfavorable (degradación extensa o pérdida de funcionalidad). En el modelo de predicción de vida útil analizado en este estudio, el nivel de degradación ( $k_n$ ) es definido en base a la extensión del revestimiento afectado por cada grupo de anomalías, teniendo en cuenta una jerarquización de las diferentes anomalías dentro de cada grupo según su gravedad. Los niveles propuestos varían entre 0 (sin degradación visible) y 4 (degradación generalizada), correspondiendo el nivel 3 al final de la vida útil de los revestimientos, a partir del cual no son aptos para desempeñar la función para la que han sido concebidos. Por tanto, es necesario proceder a una reparación generalizada con el fin de establecer las propiedades esenciales para su adecuado rendimiento.

Los coeficientes de ponderación  $k_{a,n}$  se definen según los criterios siguientes: en conformidad con los requisitos mínimos de rendimiento; propensión de causar nuevas anomalías; y el coste de reparar los defectos. En esta ponderación, los defectos más graves son más

difícil de reparar, porque tienen un coeficiente de ponderación más elevado, lo que conduce a un índice de degradación más elevado.

A continuación se describen los cuatro sistemas constructivos de fachadas analizados: a) piedra natural; b) cerámicos; c) pinturas; d) revocos. Además se establece una correlación entre la vida útil física y funcional. Esta investigación proporciona información suficiente para apoyar la toma de decisiones y optimizar las estrategias de mantenimiento.

#### ***a) Fachadas con revestimiento de piedra natural***

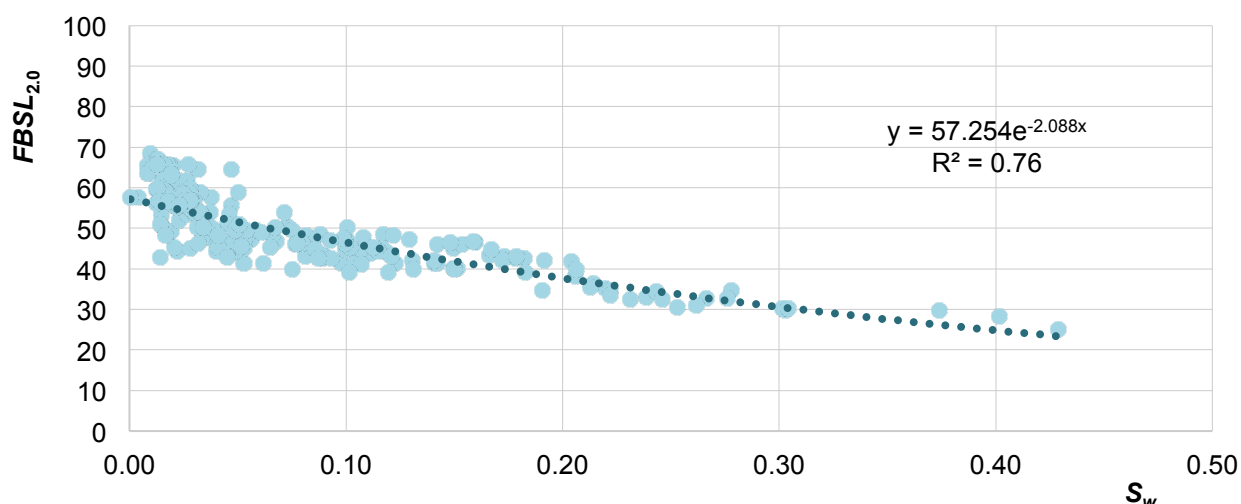
Los mecanismos de degradación son una consecuencia de la interacción entre el edificio y los agentes de degradación. En el caso de los revestimientos de fachada, éstos tienden a ser ambientales, en particular las condiciones climáticas a las que está sometido el edificio. La degradación de los elementos de construcción es una consecuencia natural del proceso de envejecimiento, pero las características de los revestimientos, como el nivel de ejecución y la falta de mantenimiento, pueden retrasar o acelerar este proceso (Emídio et al. 2014). Los revestimientos de piedra muestran diferencias significativas en términos de deterioro debido a la gran variabilidad de sus características, como el tipo de piedra y las propiedades consecuentes (color, porosidad y tipo de acabado), la orientación de las fachadas, su exposición a las condiciones ambientales (viento / lluvia y humedad) y la ubicación del edificio (distancia al mar). En este estudio, sólo se consideraron los revestimientos adheridos directamente al sustrato (ya sea mediante sellado o uso de adhesivo cementoso) (Fig. 5.12).



**Fig. 5.12.** Ejemplo de casos de estudio con revestimientos de piedra natural, en Portugal.

En este estudio, y de acuerdo con la clasificación previa propuestas por Silva et al. (2016), los defectos de revestimientos de piedra natural se clasifican en cuatro grupos: (1) defectos visuales o estéticos, que contribuyen a la degradación estética del revestimiento, no contribuyendo, por sí solo, para el final de la vida útil física; (2) defectos en las articulaciones; (3) pérdida de integridad, que conduce a la alteración física y química de la piedra natural, contribuyendo a la pérdida volumétrica de los elementos pétreos, con consecuencias graves para el rendimiento del revestimiento; y (4) pérdida de adherencia, que es el defecto más grave debido a las graves consecuencias potenciales de la caída de elementos.

La correlación entre el índice de degradación ( $S_w$ ) y el índice de funcionalidad ( $FBSL_{2.0}$ ) es inversamente proporcional (Fig. 5.13), con un coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) de -0.824 y un coeficiente de determinación ( $R^2$ - que evalúa la proporción de varianza de los valores de  $y$  ( $FBSL_{2.0}$ ) explicados por  $x$  ( $S_w$ )) de 0.76, basado en una curva exponencial obtenida ( $y = 57.244e^{-2.087x}$ ) lo que implica una alta correlación entre las dos variables consideradas. Esto significa que los niveles de degradación más altos corresponden a índices de funcionalidad más bajos y viceversa. La degradación física de los revestimientos influyen en el rendimiento de los edificios de varias maneras, a saber: i) compromete la apariencia estética del edificio y la percepción de los usuarios y propietarios; ii) aumenta la vulnerabilidad de los edificios a los agentes de degradación y, en consecuencia, aumenta el riesgo de falla de los componentes del edificio; iii) y, en última instancia, influye en la funcionalidad del edificio. Aikivuori (1999) refiere que la pérdida crítica de rendimiento suele estar influida por la percepción subjetiva del edificio, y los criterios técnicos o económicos suelen ser ignorados en las decisiones tomadas en la rehabilitación de edificios. Naturalmente, un aumento de la degradación física de los revestimientos conduce a una disminución del rendimiento funcional de los edificios, ya que la capacidad de servicio está intrínsecamente relacionada con las expectativas y requerimientos de los usuarios. Aunque son conceptos distintos, la vida útil física y funcional pueden correlacionarse y se puede decir que el deterioro físico suele conducir a una pérdida funcional del rendimiento, influyendo en el final de la vida útil funcional de los edificios. Lo contrario no es totalmente cierto, ya que incluso si el edificio presenta una condición física aceptable, sin degradación visible, el final de su vida útil funcional puede ocurrir de todos modos debido a cambios de las demandas de los usuarios.



**Fig. 5.13.** Nivel de degradación física y funcional en revestimientos de piedra natural, analizando 203 casos de estudio.

### ***b) Fachadas de revestimiento cerámico***

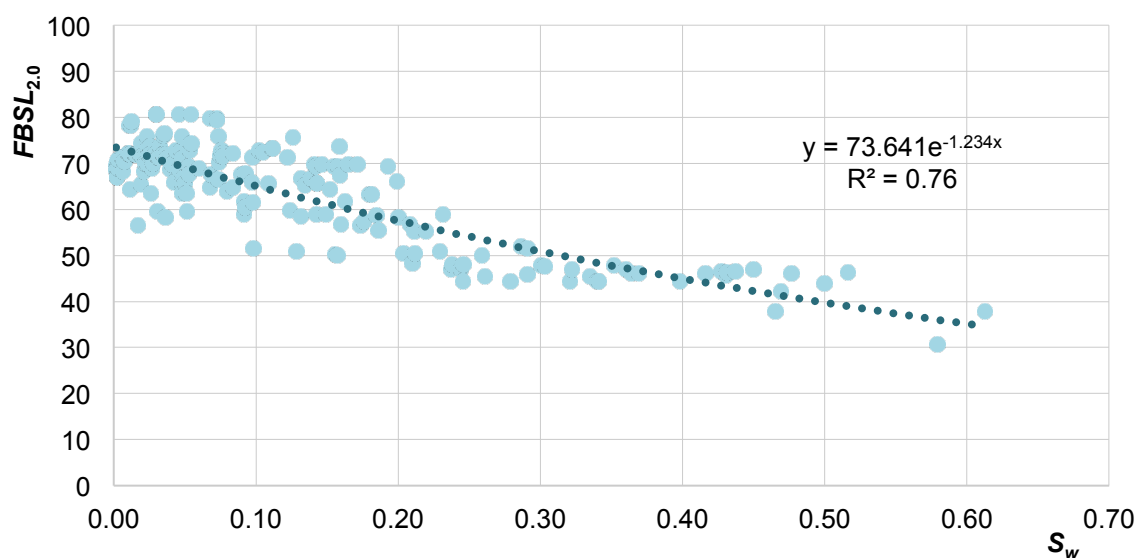
El revestimiento cerámico es uno de los sistemas de revestimiento más populares y versátiles de edificios en los países mediterráneos debido a la singular importancia que se les ha atribuido a lo largo del tiempo. Portugal tiene una larga tradición en la producción y comercialización de azulejos para uso tanto como paneles decorativos, como revestimientos (Fig. 5.14). Las baldosas cerámicas varían mucho en cuanto a dimensión, color, textura y otras características, con un gran potencial estético para su uso como revestimiento (Bovea, et al. 2010). Algunos autores Mansur et al. 2006; Wetzel et al. 2010 explican la disminución en el uso de baldosas cerámicas al enfatizar la alta incidencia de defectos de degradación física durante su vida útil, lo que afecta evidentemente a los niveles de funcionalidad de la edificación.

En este estudio, y de acuerdo con la clasificación previa propuesta por Galbusera et al. (2015), los defectos del azulejo de cerámica se clasifican en cuatro grupos: (1) defectos visuales o estéticos, que contribuyen a la degradación estética del revestimiento sin consecuencias graves sobre la degradación de los revestimientos; (2) agrietamiento; (3) defectos en las articulaciones, lo que puede poner en peligro el rendimiento de todo el sistema de baldosas, ya que las juntas son esenciales para la estanqueidad de un revestimiento y la capacidad de absorber la deformación; y (4) el desprendimiento, que es el defecto más importante debido a las graves consecuencias potenciales de los elementos cerámicos que caen en las fachadas de los edificios y el costo de las reparaciones (Lo 2002).



**Fig. 5.14.** Casos de estudio que ilustran los revestimientos cerámicos en sistemas constructivos de fachadas, en Portugal.

Al analizar las fachadas de revestimientos cerámicos, se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) de -0.87. El análisis del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), que evalúa la proporción de varianza de los valores de  $x$  ( $S_w$ ), relacionados con los de  $y$  ( $FBSL_{2,0}$ ), revela  $R^2 = 0.76$ , basado en una curva exponencial obtenida ( $y = 73.641e^{-1.234x}$ ), lo que implica una alta correlación entre las dos variables consideradas (funcionalidad y degradación) (Fig. 5.15). Para los revestimientos cerámicos, los valores de degradación ( $S_w$ ), varían entre 0.00 y 0.61, donde 0.00 corresponde a un revestimiento sin degradación visible y 1.00 al nivel de degradación máximo posible. En cuanto a la funcionalidad de los revestimientos cerámicos, los valores oscilan entre 30.60 y 80.74, dentro de un rango teórico entre 15.0 (funcionalidad mínima) y 93.0 (máxima funcionalidad).



**Fig. 5.15.** Nivel de degradación física y funcional en revestimientos cerámicos, analizando 183 casos de estudio.



### c) Fachadas con revestimiento de pintura

Según los datos del Censo 2011 publicado por el Instituto Nacional de Estadística (INE), los revestimientos de pintura son uno de los más comunes en Portugal junto con los revestimientos de revocos. Estos se componen de una película de pintura, tendencia común en todos los países del sur de Europa como España, Italia o Grecia. En la Fig. 5.16 se muestra ejemplos de casos de estudio con revestimiento de pinturas en fachadas. Otros estudios nacionales predicen una vida útil de 10 años para las fachadas con revestimientos de pinturas (Silva et al. 2016). El nivel de degradación de las fachadas pintadas está muy influenciado por su edad y las condiciones ambientales de exposición, entre otros factores (Garrido et al. 2012).

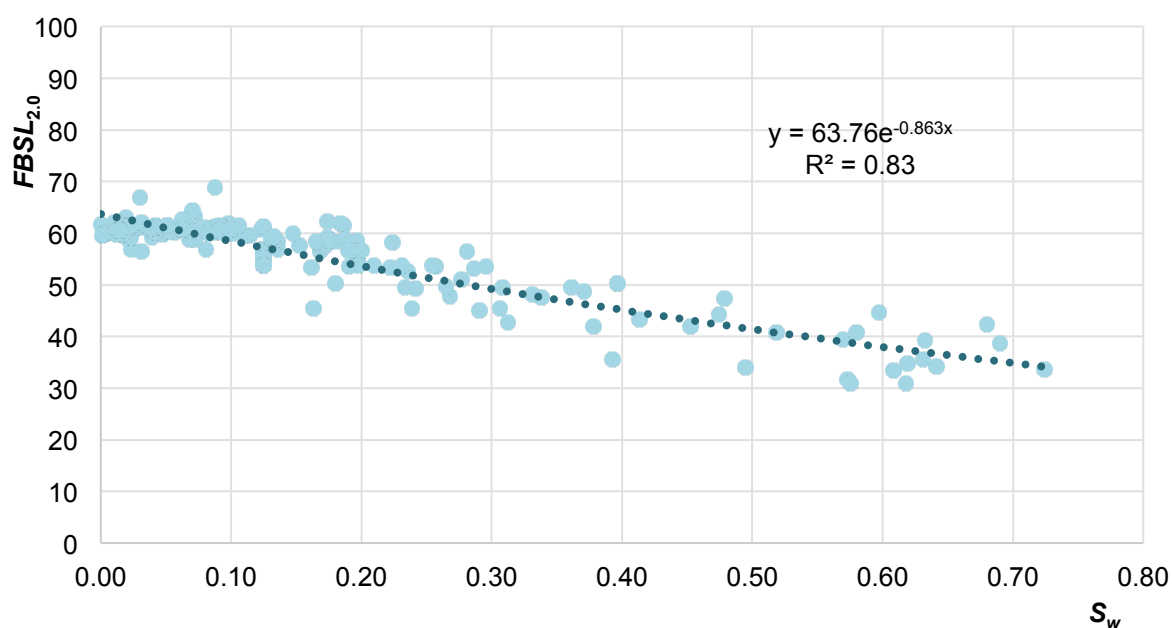
Los factores que afectan a las pinturas pueden ser tanto de origen físico, como químico, medioambiental o humano, pudiendo ocurrir en asociación con otro tipo de problemas tales como insuficiencia o ausencia de mantenimiento. En este estudio, los principales defectos que afectan a los revestimientos de pintura se agrupan en cuatro categorías (Silva et al. 2016): (1) tinción y cambio de color; (2) tizón, generalmente ocurriendo después de la pérdida de brillo y que provoca el desgaste, desprendimiento y pérdida de material; (3) agrietamiento; y (4) pérdida de adherencia (formación de ampollas y pelado), causada por el defecto combinado de diversos defectos y agentes de degradación.



**Fig. 5.16.** Casos de estudio con revestimientos de pinturas en fachadas, en Portugal.

En cuanto a las superficies pintadas, se obtuvieron un  $r = -0.91$  y un  $R^2 = 0.83$ , utilizando una curva exponencial ( $y = 63.760e^{-0.863x}$ ). Los valores de degradación de las pinturas oscilan entre 0.00 y 0.72 y los valores de funcionalidad entre 30.95 ( $FBSL_{2.0}$  mínimo) y 68.97 ( $FBSL_{2.0}$  máximo) (Fig. 5.17).





**Fig. 5.17.** Nivel de degradación física y funcional en revestimientos de pinturas, analizando 177 casos de estudio.

#### **d) Fachadas con revestimiento de revoco**

En el suroeste de Europa y específicamente en Portugal, las fachadas revestidas con revoco representan uno de los tipos de revestimiento más común, representando más del 60% de todos los edificios. Esto se debe esencialmente a su bajo costo ya que el coste de mano de obra en su ejecución en comparación con otros materiales de revestimiento es bastante más inferior.

El diagnóstico de los factores de degradación asociados al deterioro de los revestimientos no es fácil, dada la variabilidad de las posibles causas de cada defecto (Gaspar y de Brito 2011). Los factores de degradación dependen sustancialmente de las propiedades del mortero (Izaguirre et al. 2010), la calidad del diseño y ejecución, las condiciones ambientales de exposición, así como las condiciones de uso y mantenimiento (ISO 15686:2011).

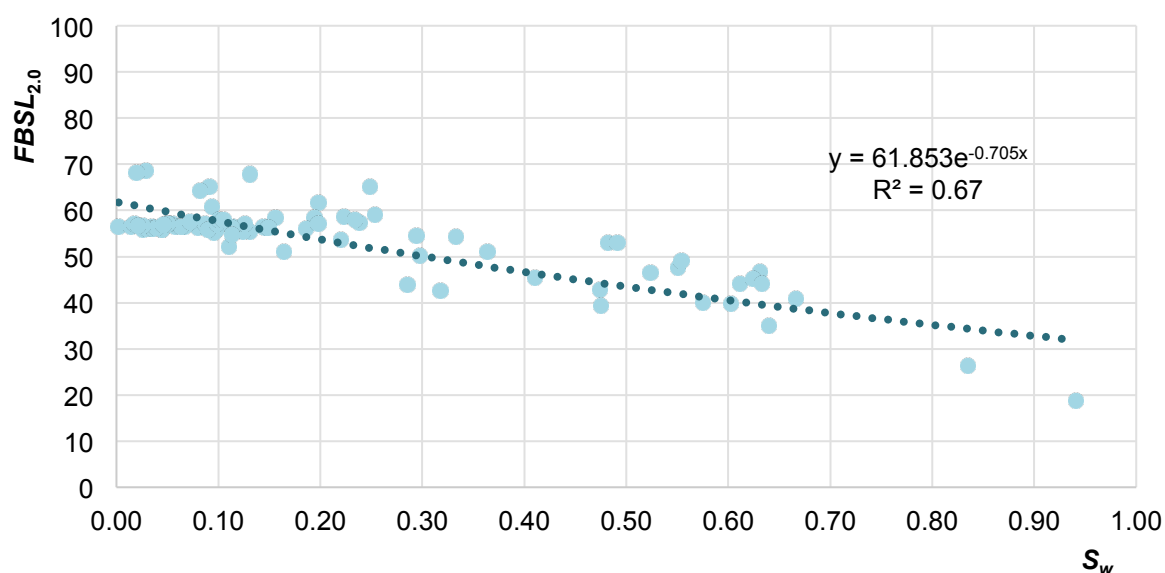
Los defectos actuales en revestimientos de fachadas con material de revoco (con o sin pintura) se pueden agrupar en tres categorías principales (Chew y de Silva 2004; Silva et al. 2016): (1) las manchas, frecuentemente asociados con la presencia de humedad son el grupo con menos consecuencias; (2) agrietamiento, más grave, puede comprometer las características de impermeabilización del revestimiento; y (3) pérdida de adherencia o

cohesión, una situación muy severa, que conduce muy a menudo al final de la vida útil del recubrimiento. Se exponen tres ejemplos de casos de estudio en la Fig. 5.18.



**Fig. 5.18.** Ejemplos de casos de estudio con revestimientos del tipo revoco, en Portugal.

Para fachadas revocadas, se obtuvieron un  $r = -0.85$  y un  $R^2 = 0.67$ , utilizando una curva exponencial ( $y = 61.853e^{-0.705x}$ ) (Fig. 5.19). Para fachadas revocadas, los valores de degradación oscilan entre 0.00 y 0.94, y los valores de funcionalidad entre 18.73 y 68.48, valor mínimo y máximo de vida útil funcional respectivamente.



**Fig. 5.19.** Degradación física y funcionalidad en revestimientos de revocos, analizando 84 casos de estudio.

### 5.6.2. Vida útil residual (RSL) y funcionalidad ( $FBSL_{2.0}$ )

Los resultados del sistema  $FBSL_{2.0}$  proporcionan indicaciones sobre la definición de los planes de mantenimiento de los edificios en relación con un ranking de prioridades. Esta tabla de clasificación permite definir qué edificio debe ser el primero en intervenir, dentro de la muestra bajo análisis. Sin embargo esta información es semi-cualitativa, proporcionando una clasificación relativa de la intervención, pero ninguna información sobre “cuando” el edificio debe ser sometido a una acción de mantenimiento.

Por lo tanto, se realizó una comparación entre los valores de  $FBSL_{2.0}$  y la vida útil residual - RSL - de los cuatro sistemas de revestimiento. Este análisis ha permitido combinar la información proporcionada por el índice de funcionalidad con una periodicidad de intervención (correlacionando el índice de funcionalidad con la RSL de los edificios analizados). La RSL de los edificios es crucial para la toma de decisiones de renovación económica y ecológicamente coherentes (Flourentzou et al. 1999). La vida útil residual RSL puede considerarse como el “período de tiempo hasta la próxima intervención requerida”.

El final de la vida útil corresponde así al instante después del cual los revestimientos son incapaces de cumplir con los requisitos de rendimiento funcional, requiriendo una acción de rehabilitación o renovación para recuperar sus características originales. La vida útil de cada caso de estudio está dada por la intersección entre la curva de degradación correlacionada y el nivel máximo de degradación admisible. En este enfoque, los valores negativos indican que estas muestras ya han alcanzado el final de su vida de servicio y, por consiguiente, ya debían haberse intervenido, por lo que deben someterse a reacondicionamientos urgentes o acciones de mantenimiento para restablecer su capacidad funcional y con el fin de cumplir con los requisitos de desempeño (Prieto et al. 2016b).

Las Tablas 5.8 - 5.11 muestran la salida del modelo funcional y el tiempo probable antes de aplicar programas de mantenimiento preventivo para cada tipo de revestimiento analizado, considerando los valores de RSL obtenidos. Los revestimientos de piedra natural, para  $FBSL_{2.0} < 34$  puntos se recomiendan actuaciones de mantenimiento (Tabla 5.8) (Artículo V). Para revestimientos cerámicos con un  $FBSL_{2.0}$  inferior a 30, el sistema no garantiza niveles de funcionalidad aceptables (Tabla 5.9). En cuando a las superficies con revestimiento de pintura que presenten un índice de funcionalidad inferior a 31 deben de someterse a una acción de mantenimiento inmediato (Tabla 5.10). Por último, para fachadas con revestimiento de revoco cuando presentan un valor de  $FBSL_{2.0}$  inferior a 18 puntos, sería

necesaria una acción inmediata de mantenimiento (Tabla 5.11). (Prieto et al. 2017a)

**Tabla 5.8.** Funcionalidad como criterio para la planificación del mantenimiento en revestimientos de piedra natural.

<i>FBSL</i> <sub>2.0</sub>	Acciones de reparación recomendadas
0-34	Inmediatamente
34-40	Próximos 5 años
40-45	Próximos 10 años
45-48	Próximos 25 años
48-60	Próximos 50 años
60-100	> 50 años

**Tabla 5.9.** Funcionalidad como criterio para la planificación del mantenimiento en revestimientos cerámicos.

<i>FBSL</i> <sub>2.0</sub>	Acciones de reparación recomendadas
30-52	Inmediatamente
52-64	Próximos 5 años
64-70	Próximos 10 años
70-80	Próximos 25 años
> 80	Próximos 50 años

**Tabla 5.10.** Funcionalidad como criterio para la planificación del mantenimiento en revestimientos de pintura.

<i>FBSL</i> <sub>2.0</sub>	Acciones de reparación recomendadas
31-54	Inmediatamente
54-61	Próximos 3 años
61-64	Próximos 5 años
> 64	Próximos 10 años

**Tabla 5.11.** Funcionalidad como criterio para la planificación del mantenimiento en revestimientos de revocos.

<i>FBSL</i> <sub>2.0</sub>	Acciones de reparación recomendadas
18-54	Inmediatamente
54-60	Próximos 10 años
> 60	Próximos 15 años

### **5.6.3 Conclusiones**

El análisis realizado en este capítulo resulta especialmente relevante en la implementación de programas de mantenimiento en grandes conjuntos de edificios. Por otra parte, los conocimientos adquiridos en este análisis permitirán desarrollar nuevos caminos que apoyen la toma de decisiones y optimicen los trabajos de mantenimiento y conservación en grandes conjuntos de edificaciones, en términos de la selección del mejor momento para llevarlos a cabo, siempre y cuando presenten características constructivas homogéneas.

Los resultados obtenidos revelan que las fachadas pintadas son el tipo de revestimiento en el que la vulnerabilidad y los riesgos del edificio son más relevantes para la degradación de las superficies de los cerramientos. En el caso de revestimientos cerámicos y revocos, aunque existe una fuerte correlación entre su funcionalidad y degradación física, existen otros factores relevantes para el deterioro de estos tipos de revestimientos, a saber, la susceptibilidad a errores de ejecución y de diseño, en el caso de revestimientos cerámicos y el tipo de mortero aplicado (entre otros factores), en el caso de revocos.

La experiencia obtenida en este estudio permite elaborar estrategias para apoyar la gestión y optimizar los trabajos de mantenimiento en términos del mejor momentos para ejecutarlos. Sin embargo, esto implica una cuidadosa y detallada planificación de las necesidades de mantenimiento, controlando los materiales y recursos económicos necesarios durante el ciclo de vida del entorno construido, permitiéndoles ser manejados de la manera más económica.



## **6 CONCLUSIONES**

---





## 6 CONCLUSIONES

La principal aportación de esta tesis doctoral es la revisión de un modelo existente capaz de estimar la vida útil funcional en conjuntos homogéneos de edificios. Se han testado sus resultados comparándolos con otras técnicas, se ha profundizado en el conocimiento de su funcionamiento y en el estudio del comportamiento de cada variable dentro del método. El sistema de inferencia difuso revisado *FBSL*<sub>2.0</sub> intenta aportar en un mejor entendimiento de la degradación funcional de edificios, contribuyendo en la sistematización de las intervenciones de mantenimiento por medio de un ranking de prioridades de actuación. Los sistemas de inferencia difusa son técnicas complejas que requieren la implementación y aplicación de un software específico. Sin embargo, estos modelos son especialmente útiles, cuando se pretenden modelar problemas con altos grados de incertidumbre, logrando mejores niveles de rendimiento y precisión que otros modelos convencionales.

Se ha comprobado que el sistema cumple con los criterios del proceso de apreciación del riesgo (identificación, análisis, evaluación y tratamiento) establecidos en la normativa internacional de gestión del riesgo ISO 31000: 2009 y

## 6 CONCLUSIONS

The main contribution of this doctoral thesis is the revision of an existing model capable of estimating functional service life in homogeneous sets of buildings. Their results have been tested comparing them with other techniques. They have deepened the knowledge of their performance and the study of the behaviour of each variable within the method. The revised fuzzy inference system *FBSL*<sub>2.0</sub> tries to contribute in a better understanding of the functional degradation of buildings, contributing in the systematization of the maintenance interventions by means of a ranking of priorities of action. The fuzzy inference systems are complex techniques that require the implementation and application of specific software. However, these models are especially useful when modelling problems with high degrees of uncertainty, achieving better levels of performance and accuracy than other conventional models.

It has been verified that the system meets the criteria of the process of risk assessment (identification, analysis, evaluation and treatment) established in the international risk management standard ISO 31000: 2009 and its transposition to the

en su transposición a la normativa española UNE EN 31010: 2011. El Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE) en su Plan Nacional de Conservación Preventiva (PNCP) recomienda la utilización de la normativa ISO 31000 como herramienta que facilita la programación, implantación y coordinación de las tareas de conservación preventiva en conjuntos de edificios patrimoniales.

Las aplicaciones teóricas con casos de estudio pre-configurados y las prácticas con edificios patrimoniales reales ayudan a comprender el funcionamiento del sistema experto avanzado *FBSL*<sub>2.0</sub>, habiéndose realizado dos:

- Un análisis de sensibilidad a modo de aplicación teórica del sistema y en base a una serie de escenarios figurados. De acuerdo con los resultados obtenidos se ha concluido que las variables de vulnerabilidad son las que presentan mayor influencia en el rendimiento del sistema, seguida por los riesgos estáticos-estructurales y antrópicos. Se ha comprobado que los riesgos atmosféricos se manifiestan con la menor influencia en la salida del modelo, cuestión que deberá ser tratada en futuras actualizaciones del sistema.

- El modelo difuso *FBSL*<sub>2.0</sub> ha sido apli-

Spanish regulations UNE EN 31010:2011. The National Institute for Cultural Heritage (IPCE) in its National Preventive Conservation Plan (PNCP) recommends the use of ISO 31000 as a tool that facility the programming, implementation and coordination of preventive conservation tasks in groups of heritage buildings.

Theoretical applications with preconfigured case studies and practices with real heritage buildings help to understand the operation of the advanced expert system *FBSL*<sub>2.0</sub>, with two:

- A sensitivity analysis as a theoretical application of the system and based on a series of figurative scenarios. According to the results obtained, it has been concluded that the vulnerability variables are those that have greatest influence on the system performance, followed by static-structural and anthropic risks. It has been proven that the atmospheric risks are manifested with the least influence on the output of the model, as issue that should be addressed in future updates of the system.

The fuzzy model *FBSL*<sub>2.0</sub> has been satis-

cado satisfactoriamente a un nuevo conjunto homogéneo de edificios patrimoniales situados en el oeste de la provincia de Sevilla (España), mostrándose como un indicador de degradación funcional de edificios. Los inmuebles que se posicionan con un menor índice de funcionalidad son aquellos que necesitan de atención preventiva con el fin de prolongar su vida útil en el tiempo y minimizar los costes de las acciones de intervención.

Se han desarrollado dos modelos simplificados basados en dos análisis de regresión múltiple lineal, uno reducido a un total de 11 variables y otro aún más simplificado con seis variables. Ambas propuestas metodológicas pretenden ser herramientas sencillas y rentables para determinar la vida útil funcional de los edificios en toda una región, estableciendo una priorización de las operaciones de mantenimiento en grupos de inmuebles con características constructivas similares, tratando de centrar la atención en los edificios con menos índice funcional ( $FBSL_{2.0} < 34$  puntos, se recomienda programar actuaciones de mantenimiento). Este enfoque proporciona algunas orientaciones sobre los riesgos y vulnerabilidades que deben analizarse cuidadosamente para minimizar la degradación del patrimonio cultural y su riesgo de deterioro.

factory applied to a new homogeneous set of heritage buildings located in the west of the province of Seville (Spain), showing itself as an indicator of functional degradation of buildings. The properties that are positioned with a lower index of functionality are those that need preventive attention in order to prolong their service life over time and minimize the costs of intervention actions.

Two simplified models have been developed based on two multiple linear regression analyses, one reduced to a total of 11 variables and another one even more simplified with six variables. Both methodological proposals are intended to be simple and cost-effective tools to determine the functional service life of buildings throughout a region, establishing a prioritization of maintenance operations in groups of buildings with similar constructive characteristics, trying to focus attention on buildings with less functional index ( $FBSL_{2.0} < 34$  points), it is recommended to schedule maintenance actions). This approach provides some guidance on risks and vulnerabilities that need to be carefully analyzed to minimize cultural heritage degradation and its risk of deterioration.

El índice de funcionalidad  $FBSL_{2.0}$  ha sido correlacionado en base a criterios cuantitativos, asociados con la vida útil física de elementos de construcción ( $S_w$ ). Para ello se analizaron las condiciones de degradación en revestimientos de fachada de piedra natural, material cerámico, enfoscados y pinturas (siglos XIX - XXI) ubicados en Portugal. En este sentido, se han determinado fuertes coeficientes de determinación entre ambos sistemas y con una correlación inversa, es decir a medida que aumenta la degradación física del revestimiento de fachada, disminuye la funcionalidad del edificio. Los resultados obtenidos indican que las fachadas con revestimiento de pintura presentan mayor relación con los factores de vulnerabilidad y riesgos del edificio. También, se han establecido escalas jerárquicas de prioridad de intervención entre los cuatro sistemas de revestimientos, además en base a los índices de vida útil funcional y física se han estimado tiempos de intervención.

Por último, se ha llevado a cabo un análisis de 20 parroquias utilizando un conjunto de 390 registros histórico-temporales desde los siglos XIII-XIV hasta la actualidad. Este enfoque ha permitido comprender los puntos débiles de este tipo de edificios: la cubierta se ha establecido como uno de los ele-

Gle

The  $FBSL_{2.0}$  functional index has been correlated on the basis of quantitative criteria, associated with the physical service life of buildings elements ( $S_w$ ). For this purpose, degradation conditions were analysed for facades claddings made of natural Stone, ceramic, plaster and paints (19<sup>th</sup> – 21<sup>st</sup> centuries) located in Portugal. In this sense, strong coefficients of determination have been determined between both systems and with an inverse correlation, that is to say as the physical degradation of the facades cladding increases, the functionality of the building decreases. The results indicate that the facades with paint coatings are more related to the factors of vulnerability and risks of the building. Also, hierarchical priority scales of intervention have been established between the four systems of coatings, in addition based on the functional and physical service life indices, intervention times have been estimated.

Finally, an analysis of 20 parishes has been carried out using a set of 390 historical temporal records from the 13<sup>rd</sup>-14<sup>th</sup> centuries to the present day. This approach has made it possible to understand the weak points of this type of buildings: the roof has established itself

mentos más vulnerables, mostrando la mayor incidencia de anomalías y siendo responsable de la mayoría de las decisiones de intervención. Los problemas de humedad se han identificado como la principal causa de patología en estos edificios patrimoniales y es un factor ambiental determinante en el proceso de degradación.

as one of the most vulnerable elements, showing the highest incidence of anomalies and being responsible for most of the intervention decisions. Moisture problems have been identified as the main cause of pathology in these heritage buildings and are a determining environmental factor in the degradation process.



## **7 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

---





## 7 Futuras líneas de investigación

Entre las futuras líneas de investigación se considera que puede tener especial interés profundizar en el análisis de registros históricos relacionados con actuaciones de mantenimiento preventivo y conservación de edificios. En este sentido, se ha realizado un primer estudio donde se han identificado las principales anomalías y causas más probables de situaciones de degradación funcional de edificios patrimoniales. Este enfoque permite comprender los puntos débiles de los edificios, que deben ser analizados cuidadosamente mediante inspecciones periódicas. Con el análisis de los datos de mantenimiento y conservación se puede contribuir en la identificación del tiempo de intervención óptimo para realizar las acciones de mantenimiento preventivo, reduciendo así los costos de conservación durante el ciclo de vida de los edificios.

Entre otras futuras líneas de investigación también se consideran las siguientes:

- Considerar la definición de nuevas variables de riesgos extremos, como por ejemplo: riesgo sísmico, riesgo de inundación, tsunami, huracán. Esta línea fue comentada por los revisores internacionales durante la fase de revisión de los artículos.
- Nuevas aplicaciones en escenarios y ubicaciones tanto dentro como fuera de Europa, incluyendo posibles estudios en nuevas tipologías constructivas de edificios patrimoniales. A este respecto se están estudiando las construcciones patrimoniales en madera situadas en la Región de Los Ríos (sur de Chile). El sistema se deberá de ser ajustado a las nuevas realidades y circunstancias prevalecientes en cada lugar de aplicación; actualmente existe un artículo en proceso de elaboración.
- Estudio de los costes económicos en edificios a lo largo del tiempo, registros histórico-temporales de las intervenciones de mantenimiento, conservación y rehabilitación efectuadas durante todo el período de su vida útil.



## **8** REFERENCIAS

---



## 8 REFERENCIAS

1. Archives of Archdiocese of Seville. 2016. <http://www.archisevilla.org/documentacion/archivo-historico/> (accessed August 30, 2016).
2. Alcalá, R., Casillas, J., Cordón, O., González, A., Herrera, F. 2005. A genetic rule weighting and selection process for fuzzy control of heating, ventilating and air conditioning systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 18(3), 279–296.
3. AIJ .1993. The English edition of the principal guide for service life planning of buildings. Architectural Institute of Japan, Tokyo
4. Aikivuori A. M. 1999. Critical loss of performance—what fails before durability. In: 8th International conference on durability of buildings materials and components, Vancouver, Canada, pp 1369–1376.
5. Athmani, A. E., Gouasmia, A., Ferreira, T. M., Vicente, R., Khemis, A. 2015. Seismic vulnerability assessment of historical masonry buildings located in Annaba city (Algeria) using non ad-hoc data survey. *Bulletin of Earthquake Engineering* 13 (8):2283–307. doi:10.1007/s10518-014- 9717-7.
6. Babuška, R., Verbruggen, H. B. 1996. An overview of fuzzy modeling for control. *Control Engineering Practice*, 4(11), 1593-1606.
7. Balaras, A., Droutsas, K., Dascalaki, E., Kontoyiannidis, S. 2005. Deterioration of European apartment buildings. *Energy and Building* 37(5):515–527
8. Beer, H. R., Kerber, C., Schläpfer, J.-L., Rieche, G., Unold, H., Wehrle, S. 2011. Longterm field studies and residual service life prediction of FPO roofing membranes. In: 12th international conference on durability of building materials and components, Porto, Portugal
9. Bordalo, R., de Brito, J., Gaspar, P. L., Silva, A. 2011. Service life prediction modelling of adhesive ceramic tiling systems. *Building Research and Information*. 39 (1):66–78.
10. Bovea, M. D., Díaz-Albo, E., Gallardo, A., Colomer, F. J., Serrano, J. 2010. Environmental performance of ceramic tiles: Improvement proposals. *Materials and Design*, 31(1), 35–41. doi:10.1016/j.matdes.2009.07.021
11. Brand, S. 1997. *How buildings learn: what happens after they're built?*, 1st edn. Phoenix Illustrated, London.
12. Brandt E., Rasmussen M. Assessment of building conditions. *Energy and Buildings* 2002; 34(2): 121-125.
13. Brisch, C., Englund, F. 2005. Service life prediction methods—outcome of TFPC questionnaire. Cost E37 workshop, 19–21 June 2005, Oslo.
14. BSI. 1992. *Guide to durability of buildings and building elements, products and components*, BS 7543. British Standards Institution, London

15. Carretero-Ayuso, M. J., Moreno-Cansado A., Cuerda-Correa E. M. 2015. Research and analysis on recurring anomalies in foundations and structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 30 (3):04015037. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000779.
16. Carter, R. W., Bramley, R. 2002. Defining heritage values and significance for improved resource management: An application to Australian tourism. *International Journal of Heritage Studies* 8 (3):175–99. doi:10.1080/13527250220000/18895.
17. Cebon Lipovec, N., Van Balen, K. 2008. Preventive conservation and maintenance of architectural heritage as means of preservation of the spirit of place. 16th ICOMOS General Assembly and Int. Symp.: Finding the Spirit of Place—Between the Tangible and the Intangible, UNESCO, Paris.
18. Chai, C., De Brito, J., Gaspar, P. L., Silva, A. 2015. Statistical modelling of the eservice life prediction of painted surfaces. *International Journal Strategic Property Management*, 19(2), 173–185.
19. Chew, M. Y. L., de Silva, N. 2004. Factorial method for performance assessment of building façades. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(4), 525– 33. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:4(525)
20. Colao, F., Fantoni, R., Ortiz, P., Vázquez, M. A., Martín, J. M., Ortiz, R., Idris, N. 2010. Quarry identification of historical building materials by means of laser induced breakdown spectroscopy, x-ray fluorescence and chemometric analysis. *Spectrochimica Acta Part B* 65:688–94. doi:10.1016/j.sab.2010.05.005.
21. CTE (Código Técnico de Edificación). 2007. Spanish technical building code. Industry Ministry—Institute of Energy Savings and Diversification, Madrid, Spain (in Spanish).
22. Daniotti, B., Spagnolo, S. L., Paolini, R. 2008. Factor method application using factors' grid. In: 11th International conference on durability of building materials and components, Istanbul, Turkey, 2008, T41.
23. Dann, N., Wood, S. 2004. Tensions and omissions in maintenance management advice for historic buildings. *Structural Survey*, 22(3), 138–147.
24. Davies, G., Szigeti, F. 1999. Are facilities measuring up? Matching building capacities and functional needs. In: CIB W078 workshop on information technology in construction 1999, Vancouver, Canada, pp 1856–1866
25. Delegou, E. T., Doulamis, A., Moropoulou, A. 2012. Decision making system on the assessment of cleaning interventions using combined fuzzy C-Means and neural networks. *Heritage protection from documentation to interventions*, in: Proceedings of the EU-CHIC International Conference on Cultural Heritage, Split, Croatia, pp. 187–190.
26. de la Edificación, L. D. O., de la Edificacion, R. B., y Garantias, R. Y. (2001). “Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación.” Modificada por la Ley, Spain (in Spanish).
27. DeSimone, L. D., Popoff, F. 1998. Eco-efficiency. In: *The business link to sustainable development*, 2nd edn. MIT Press, USA, p 280.

28. Delgado, A., de Brito, J., Silvestre, J. D. 2013. Inspection and diagnosis system for wood flooring. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 27 (5):564–74. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000342.
29. Donca, G., Mihăilă, I., Ganea, M., Hirle, D., Nica, M. 2007. Maintenance role in life cycle management. *Ann Oradea Univ Fascicle Manage Technol Eng* 6(16):2158–2163
30. Eidsvig, U. M. K., Papathoma-Köhle, M., Du, J., Glade, T., Vangelsten, B. V. 2014. Quantification of model uncertainty in debris flow vulnerability assessment, *Engineering Geology*. 181 15–26.
31. Emídio, F., de Brito, J., Gaspar, P. L., Silva, A. 2014. Application of the factor method to the estimation of the service life of natural stone cladding. *Construction and Building Materials*, 66, 484–493.
32. European Commission. 2000. Protection, conservation and enhancement of cultural heritage: Opportunities for European enterprises. Proc., 4th European Commission Conf., Ministry of Culture and Communication, Paris.
33. Field, A. P. 2009. *Discovering statistics using SPSS*, 3rd edn. Sage Publications, California, USA.
34. Flores-Colen, I., de Brito, J. 2010. A systematic approach for maintenance budgeting of buildings façades based on predictive and preventive strategies. *Construction and Building Materials* 24(9):1718–1729.
35. Flores-Colen, I., de Brito, J., De Freitas, V. P. 2008. Stains in facades' rendering–diagnosis and maintenance techniques' classification. *Construction and Building Materials* 22 (3):211–21. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.08.023.
36. Flourentzou, F., Brandt, E., Wetzel, C. 1999. MEDIC – A method for predicting residual service life and refurbishment investment budgets. Proc. 8th International Conference on the Durability of Building Materials and Components, Vancouver, Canada, pp. 1280–1288.
37. Freitas, V. P., Corvacho, H., Quintela, M., Delgado, J. M. P. Q. 2013. Durability assessment of adhesive systems for bonding ceramic tiles on façades: the research and the practice. In: *Durability of building materials and components, building pathology and rehabilitation*, vol 3. Springer, Berlin, pp 173–205
38. Galbusera, M. M., de Brito, J., Silva, A. 2015. Application of the factor method to the prediction of the service life of ceramic external wall cladding. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(3), 04014086. doi:10.1061/ (ASCE)CF.1943-5509.0000588
39. Garcez, N., N. Lopes, J. de Brito, and J. Silvestre. 2012a. System of inspection, diagnosis and repair of external claddings of pitched roofs. *Construction and Building Materials* 35:1034– 44. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.06.047.
40. Garrido, M. A., Paulo, P. V., Branco, F. A. 2012. Service life prediction of façade paint coatings in old buildings. *Construction and Building Materials*, 29, 394–402. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.057

41. Gaspar, P., de Brito, J. 2011. Limit states and service life of cement renders on façades. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(10), 1396–1404. doi:10.1061/(ASCE)MT. 1943-5533.0000312
42. Gaspar P., de Brito J. Service life estimation of cement-rendered facades. *Building Research & Information* 36(1): 44-55, 2008.
43. Haapio, A., Viitaniemi, P. 2008. How workmanship should be taken into account in service life planning. In: 11th International conference on durability of building materials and components, Istanbul, Turkey, T45
44. Hovde, P. J. 2002. The factor method for service life prediction from theoretical evaluation to practical implementation. In: 9th International conference on durability of buildings materials and components, Brisbane, Australia, Paper 232
45. Howard, P., Pinder, D. 2003. Cultural heritage and sustainability in the coastal zone: experiences in south west England. *Journal of Cultural Heritage*, 4(1), 57-68.
46. Heritage Conservation Network. 2015. The Heritage Conservation Network works in a number of countries around the world on a variety of project types, including preservation of historic buildings and landscapes.
47. Ipekoglu, B. 2006. An architectural evaluation method for conservation of traditional dwellings. *Building and Environment* 41 (3):386–94. doi:10.1016/j.buildenv.2005.02.009.
48. Izaguirre, A., Lanas, J., Álvarez, J. I. 2010. Ageing of lime mortars with admixtures: Durability and strength assessment. *Cement and Concrete Research*, 40(7), 1081–1095. doi:10.1016/j.cemconres.2010.02.013
49. ICOMOS (International Council on Monuments and Sites). 1987. The Burra charter. Australia.
50. Ilgin, M., Tunali, S. 2007. Joint optimization of spare parts inventory and maintenance policies using genetic algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 34(5–6), 594–604.
51. Ilozor, B. D., Okoroh M. I., Egbu C. E. 2004. Archicentre Understanding residential house defects in Australia from the State of Victoria. *Building and Environment* 39 (3):327–37.
52. IMSE-CNM (Instituto de Microelectrónica de Sevilla). (2012). Herramientas de CAD para lógica difusa. [http://www2.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy/Xfuzzy\\_3.3/index.html](http://www2.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy/Xfuzzy_3.3/index.html) (Dec. 22, 2012).
53. ISO. Risk Management – Principles and Guidelines, ISO 31000, 2009, pp. 2009.
54. ISO. Risk Management – Vocabulary. Guide 73, 2009, pp. 2009.
55. ISO 15686-1 (2011) Buildings and constructed assets—service life planning—Part 1: general principles and framework. International Organization for Standardization, Switzerland
56. Jager, R., Verbrugen, H. B., Bruhx, P. M. 1993. The role of defuzzification methods in the



- application of fuzzy logic. Proc., Symp. on Intelligent Components and Instruments for Control Applications, Pergamon Press, Oxford, U.K.
57. C. Kahraman, M. Yavuz (Eds.). 2010. Production engineering and management under fuzziness. Studies in fuzziness and soft computing, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
58. Kickert, W. J. M., Lemke, H. R. 1976. van Nauta Application of a fuzzy controller in a warm water plant. *Automatica*, 12 (4): 301-308.
59. Kooymans, R., Abbott, J. 2006. Developing an effective service life asset management and valuation model. *Journal of Corporate Real Estate*, 8(4):198–212
60. Kosko, B. 1994. Fuzzy systems as universal approximators. *IEEE Trans Comput* 43 (11):1329–1333
61. Kutut, V., Zavadskas, E. K., Lazauskas, M. 2014. Assessment of priority alternatives for preservation of historic buildings using model based on ARAS and AHP methods, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14 (2): 287–294.
62. Kyle, B. R. 2001. Toward effective decision making for building management. In: APWA international public works congress, NRCC/CPWA/IPWEA seminar series “innovations in urban infrastructure”, Philadelphia, USA, pp 51–69
63. Long, A. E., Henderson, G. D., Montgomery, F. R. 2001. Why assess the properties of near-surface concrete? *Construction and Building Materials*, 15(2–3):65–79
64. Lordsleem, A. C., Jr. 2016. Cracks of masonry partition walls in multifloor building: Case study. In J. M. P. Q. Delgado (Ed.), *Case Studies of Building Pathology in Cultural Heritage*, 183–98. Singapore: Springer Science+Business Media.
65. Mazzanti, M. 2002. Cultural heritage as multi-dimensional, multi-value and multi-attribute economic good: toward a new framework for economic analysis and valuation. *The Journal of Socio-Economics*, 31(5), 529-558.
66. Lacasse, M. A., Sjöström, C. 2004. Recent advances in methods for service life prediction of buildings materials and components—an overview. In: CIB World Building Congress, Canada, pp 1–10.
67. Lacasse, M. A., Kyle, B. R., Talon, A., Boissier, D., Hilly, T., Abdulghani, K. 2008. Optimization of the building maintenance management process using a markovian model. In: 11th international conference on the durability of building materials and components, Istanbul, Turkey, pp 1–9 (T72)
68. Law on Construction Planning. 2007. RehabiMed method, traditional mediterranean architecture. II: Rehabilitation buildings. RMSU Euromed Heritage, Brussels, Belgium.
69. Leung Arthur, W. T., Tam, C. M., Liu, D.K. 2001. Comparative study of artificial neural networks and multiple regression analysis for predicting hoisting times of tower cranes, *Building and Environment*, 36 (4): 457–467.
70. Liu, M., Frangopol, D. M. 2005. Multiobjective maintenance planning optimization for deterioro-

- rating bridges considering condition, safety, and life-cycle cost. *Journal of Structural Engineering*, 131(5), 833–842.
71. Lo, Y. 2002. Delamination of external wall finishes of housing. *Proc. 30th IAHS World Congress on Housing – Housing Construction – An Interdisciplinary Task*, FCTUC, Coimbra, Portugal, pp. 1571–1576.
  72. Löfsten, H. 2000. Measuring maintenance performance-in search for a maintenance productivity index. *International Journal of Production Economics*, 63(1), 47–58.
  73. Lounis, Z., Lacasse, M. A., Vanier, D. J., Kyle, B. R. 1998. Towards standardization of service life prediction of roofing membranes. In: Wallace TJ, Rossiter Jr WJ (eds) *Roofing research and standards development*. ASTM STP 1349, vol 4. American Society for Testing and Materials.
  74. Macías-Bernal, J. M., Calama, J. M., Chávez, M. J. 2014. Prediction model of the useful life of a heritage building from fuzzy logic. *Informes de la Construcción*, 66(533), 1–11.
  75. Mamdani, E. H., Assilian, S. 1975. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1–13.
  76. Mansur, A. A. P., Nascimento, O. L., Mansur, H. S. 2006. Data collection of five years of exterior façade pathologies in Brazil. *Proc. 9th World Congress of Ceramic Tile Quality, QUALICER*, Castellon, Spain, pp. PBB107–PBB120.
  77. Marteinsson, B. 2003. Assessment of service lives in the design of buildings—development of the factor method. *Licentiate thesis*, KTH's Research School—HiG, Centre of Built Environment, University of Gävle, Sweden
  78. Martin, J. W., Saunders, S. C., Floyd, F. L., Wineburg, J. P. 1996. *Methodologies for predicting the service lives of coating systems*. Federation of Societies for Coatings Technology, Blue Bell, Pennsylvania, USA.
  79. Mateus, R., Bragança, L., Koukkari, H. 2008. Sustainability assessment and rating of Portuguese buildings. In: *World sustainable conference (SB08)*, Melbourne, Australia, pp 959–966.
  80. Mishra, J., Ghosh, S. 2014. Uncertain query processing using vague set or fuzzy set: which one is better? *International Journal of Computers Communications and Control*, 9 (6):730–740.
  81. Montgomery, D. C. Peck, E. C., Vining, G. G. 2001. *Introduction to linear regression analysis*, 3rd ed., Wiley, USA.
  82. Moreno-Velo, F. J., Baturone, I., Barriga, A., Sánchez-Solano, S. 2007. Automatic tuning of complex fuzzy system with Xfuzzy. *Fuzzy Sets and System*, 158(18), 2026–2038.
  83. Moy, R. L., Chen, L.-S., Kao, L. J. 2014. Multiple linear regression. *Study guide for statistics for business and financial economics*, A supplement to the textbook by Cheng- Few Lee, John C. Lee and Alice C. Lee, 1st ed., pp. 223–240.
  84. Moser, K. 2004. Engineering design methods for service life prediction. CIB W080/RILEM 175 SLM: service life methodologies prediction of service life for buildings and components, task

- group: performance based methods of service life prediction, Trondheim, Norway, pp 52–95
85. National Cathedrals Plan. 1990. [http://ipce.mcu.es/pdfs/PNCatedrales\\_Completo\\_EN.pdf](http://ipce.mcu.es/pdfs/PNCatedrales_Completo_EN.pdf)
86. Neto, N., de Brito, J. 2012. Validation of an inspection and diagnosis system for anomalies in natural stone cladding (NSC). *Construction and Building Materials* 30:224–36. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.032.
87. NS 3422. 1994. Specification texts for operation, maintenance and renewal of buildings and civil engineering works. Norges Standardiseringsforbund, Oslo, Norway.
88. Opina version 3 [Computer software]. Servicio de Informática y Comunicaciones de la Universidad de Sevilla, Seville, Spain.
89. Okasha, N. M., Frangopol, D. M. 2009. Lifetime-oriented multi-objective optimization of structural maintenance considering system reliability, redundancy and life-cycle cost using GA. *Structural Safety*, 31(6), 460–474.
90. Ortiz, R., Ortiz, P. 2016. Vulnerability index: A new approach for preventive conservation of monuments. *International Journal of Architectural Heritage, Conservation, Analysis and Restoration*, 10(8), 1078–1100.
91. Ortiz, P., Antunez, V., Martín, J. M., Ortiz, R., Vázquez, M. A., Galán, E. 2014. Approach to environmental risk analysis for the main monuments in a historical city. *Journal of Cultural Heritage*, 15(4), 432–440.
92. Paulo, P. V., Branco, F., de Brito, J. 2014. Buildings life: a building management system. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(3):388–397.
93. Pearce, D. 2003. The social and economic value of construction. In: *The construction industry's contribution to sustainable development*. NCRISP, Davis Langdon Consultancy, London.
94. Pickard, R., Pickerill, T. 2002. Conservation finance 1: Support for historic buildings. *Structural Survey* 20 (2):73– 77. doi:10.1108/02630800210433846.
95. Poulos, H. G. 2016. Tall building foundations: Design methods and applications. *Innovative Infrastructure Solutions* 1 (1):1–51. doi:10.1007/s41062-016-0010-2.
96. Prieto, A. J., Chávez, M. J., Garrido-Vizueté, M. A., Macías-Bernal, J. M. Alejandro, F. J. 2016c. Time series on functional service life of buildings using Fuzzy Delphi method. *Proceedings of the 16th International Conference on Computational and Mathematical Methods in Science and Engineering, CMMSE 2016, Rota, Spain, ISBN: 978-84-608-6082-2*.
97. Prieto, A. J., Macías-Bernal, J. M., Chávez, M.-J. 2015. Series temporales de factores principales para la conservación preventiva del patrimonio, 5o Congreso de Patología y Rehabilitación de Edificios Porto, Portugal, ISBN: 78-972-752-177-7.
98. Prieto, A. J., Macías-Bernal, J. M., Chávez, M. J., Alejandro, F. J. 2016a. Expert system for predicting buildings service life under ISO 31000 standard. Application in architectural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 18, 209–218. DOI: 10.1016/j.culher.2015.10.006

99. Prieto, A. J., Macías-Bernal, J. M., Chávez, M. J. Alejandro, F. J. 2017c. Fuzzy modelling in functional service life of architectural heritage buildings. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 04017041. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001021.
100. Prieto, A. J., Silva, A., de Brito, J., Alejandro, F. J. 2016b. Functional and physical service life of natural stone claddings. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12), 04016150. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001663.
101. Prieto, A. J., Silva, A., de Brito, J., Macias-Bernal, J. M. 2017a. Serviceability of facade claddings. *Building Research & Information*, 1-12. DOI: 10.1080/09613218.2016.1264808.
102. Prieto, A. J., Silva, A., de Brito, J., Macias-Bernal, J. M. Alejandro, F. J. 2017b. The influence of the pathological situations on built heritage functionality: an approach based on historical records. *International Journal of Architectural Heritage*, 11(4), 566-587.
103. Prieto, A. J., Silva, A., de Brito, J., Macías-Bernal, J. M., Alejandro, F. J. (2017d). Multiple linear regression and fuzzy logic models applied to the functional service life prediction of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*. DOI: 10.1016/j.culher.2017.03.004.
104. Rikey, M., Cotgrave, A. 2005 The context of maintenance. In: *Construction technology. The technology of refurbishment and maintenance*, vol. 3. Macmillan Palgrave, New York, pp 50–56
105. Ross, T. J. 2010. *Fuzzy logic with engineering applications*, Wiley, Hoboken, NJ.
106. Rudbeck, C. 2002. Service life of building envelope components: making it operational in economical assessment. *Construction and Building Materials*, 16(2):83–89
107. Sá, G., Sá, J., de Brito, J., Amaro, B. 2014. Inspection and diagnosis system for rendered walls. *International Journal of Civil Engineering* 12 (2):279–90.
108. Sarja, A. 2005. Generic limit state design of structures. In: *10th International conference on durability of building materials and components*, Lyon, France, TT3-161.
109. Shohet, I., Rosenfeld, Y., Puterman, M. and Gilboa, E. (1999) Deterioration patterns for maintenance management - a methodological approach. In: *8th Int. Conference on Durability of Building Materials and Components*, 1999, Vancouver, Canada. 1666-1678.
110. Sjöström, C., Davies, H. 2005. Built to last: service life planning. *ISO Focus* 2(11):13–15
111. Silva, A., de Brito, J., Gaspar, P. L. 2016. Methodologies for service life prediction of buildings. With a focus on façade claddings. *Green Energy and Technology*, Springer International Publishing. doi:978-3-319-33288-8
112. Silva, A., de Brito, J., Gaspar, P. L. 2012. Application of the factor method to maintenance decision support for stone cladding, *Automation in Construction*, 22, 165–174.
113. Silva, A., Dias, J. L., Gaspar, P. L., de Brito, J. 2013. Statistical models applied to service life prediction of rendered facades, *Automation in Construction*, 30, 151–160.
114. Silva, A., Gaspar, P. L., de Brito, J. 2014. Durability of current renderings: A probabilistic

- analysis. *Automation in Construction*, 44, 92–102. doi:10.1016/j.autcon.2012.11.028
115. Silvestre, J. D., de Brito, J. 2009. Inspection and repair of ceramic tiling within a building management system. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22 (1):39–48. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:1(39).
116. Spanish Technical Building Code. 2007. Industry ministry—Institute of energy savings and diversification (IDAE). Spain.
117. SPSS [Computer software]. IBM, Armonk, NY.
118. Talon, A., Boissier, D., Chevalier, J.-L., Hans, J. 2005. Temporal quantification method of degradation scenarios based on FMEA. In: 10th International conference on durability of building materials and components, Lyon, France, TT4-139.
119. Teodorescu, H. N. L. 2013. On the characteristic functions of fuzzy systems. *International Journal of Computers Communications and Control* 8 (3): 469-476.
120. Tolman, F., Tolman A. 2003. Optimization and decision making in sustainable construction and operation, in: 2nd ILCDES Conference, Kuopio, Finland.
121. UNE EN ISO/IEC 31010. 2011. Risk Management – Risk Assessment Techniques Focuses On Risk Assessment. Risk Assessment Helps Decision Makers Understand The Risks That Could Affect The Achievement Of Objectives As Well As The Adequacy Of The Controls Already In Place.
122. UNE (Una Norma Española). 2009. AENOR, Norma UNE 41805 Diagnóstico de edificios. 41805-3, Madrid, Spain (in Spanish).
123. Van Horenbeek, A., Pintelon, L., Muchiri, P. 2010. Maintenance optimization models and criteria. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 1(3), 189–200.
124. Vásquez, V. Rosales, N. 2015. Caracterización de la Vulnerabilidad Patrimonial. Valdivia, Un Caso en Estudio en La Evaluación del Riesgo Sísmico a Escala Urbana”, *Revista Síntesis Tecnológica*, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile.
125. Vieira, S. M., Silva, A., Sousa, J. M. C., de Brito, J., Gaspar, P. L. 2015. Modelling the service life of rendered façades using fuzzy systems. *Automation in Construction*, 51: 1–7;
126. Vigil-Escalera Pacheco, M. 1991. Iglesias mudéjares sevillanas de los siglos XIII, XIV y XV. Propuesta para su restauración, conservación y mantenimiento. Doctoral Thesis, University of Seville, Seville, Spain [in Spanish].
127. Walter, A., J. de Brito, and J. Grandão Lopes. 2005. Current flat roof bituminous membranes waterproofing systems - inspection, diagnosis and pathology classification. *Construction and Building Material* 19 (3):233–42. doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.05.008.
128. Watt, D. S. 1999. *Building pathology: Principles and practice*, Blackwell Science, Oxford, U.K.
129. Weber, S. 1983. A general concept of fuzzy connectives, negations and implications based on

- t-norms. *Fuzzy Sets and System*, 11(1–3), 115–134.
130. Wekesa, B. W., Steyn, G. S., Otieno, F. A. O. 2010. The response of common building construction technologies to the urban poor and their environment. *Building and Environment*, 45(10):2327–2335
  131. Wetzel, A., Zurbriggen, R., Herwegh, M. 2010. Spatially resolved evolution of adhesion properties of large porcelain tiles. *Cement and Concrete Composites*, 32(5), 327–338. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.02.002
  132. Xfuzzy 3.0 [Computer software]. CNM-Centro Nacional de Microelectrónica y IMSE-Instituto de Microelectrónica de Sevilla, Seville, Spain.
  133. Zadeh LA (1965) Information and control. *Fuzzy sets*, 8(3):338–353
  134. Zamarreño, T., Girón, S., Galindo, M. 2008. Assessing the intelligibility of speech and signing in Mudejar-Gothic churches. *Applied Acoustics* 69:242–54. doi:10.1016/j.apacoust.2006.09.007.
  135. Zheng, G., Jing, Y., Huang, H., Shi, G., Zhang, X. 2010. Developing a fuzzy analytic hierarchical process model for building energy conservation assessment, *Renewable Energy* 35 (1): 78–87.

**ANEXOS:**

**Anexo 1. Publicaciones**

---





## **Artículo I.**

### **Fuzzy modelling of the functional service life of architectural heritage buildings**

A. J. Prieto, J. M. Macías-Bernal, María-José Chávez y F. J. Alejandro

Revista: **Journal of Performance of Constructed Facilities**

Índice de Impacto – JCR (2015): 0.893,

posición nº 35 de 61 títulos en el campo de Construction & Building Technology (Q3).

Aceptado: **02 diciembre 2016**

Publicación: **14 marzo 2017**



## **Artículo II.**

### **Expert system for predicting buildings service life under ISO 31000 standard. Application in architectural heritage**

A. J. Prieto, J. M. Macías-Bernal, María-José Chávez y F. J. Alejandro

Revista: **Journal of Cultural Heritage**

Índice de Impacto – JCR (2014): 1.568,

posición nº 130 de 260 títulos en el campo de Materials Science, Multidisciplinary (Q2)

Aceptado: **30 octubre 2015**

Publicación: **26 noviembre 2015**



### **Artículo III.**

#### **Multiple linear regression and fuzzy logic models applied to the functional service life prediction of cultural heritage**

A. J. Prieto, A. Silva, J. de Brito, J. M. Macías-Bernal, F. J. Alejandre

Revista: **Journal of Cultural Heritage**

Índice de Impacto – JCR (2015): 1.533,

posición nº 148 de 271 títulos en el campo de Materials Science, Multidisciplinary (Q3).

Aceptado: **22 marzo 2017**

Publicación: ---



## **Artículo IV.**

### **The influence of pathological situations on built heritage functionality: An approach based on historical records**

A. J. Prieto, A. Silva, J. de Brito, J. M. Macías-Bernal, F. J. Alejandre

Revista: **International Journal of Architectural Heritage**

Índice de Impacto – JCR (2015): 1.025,

posición nº 28 de 61 títulos en el campo de Construction & Building Technology (Q2).

Aceptado: **12 diciembre 2016**

Publicación: **21 febrero 2017**





## **Artículo V.**

### **Functional and physical service life of natural Stone claddings**

A. J. Prieto, A. Silva, J. de Brito y F. J. Alexandre

Revista: **Journal of Materials in Civil Engineering**

Índice de Impacto – JCR (2014): 1.296,

posición nº 19 de 59 títulos en el campo de Construction & Building Technology (Q2).

Aceptado: **11 abril 2016**

Publicación: **7 julio 2016**



## **Artículo VI. Serviceability on facade claddings**

A. J. Prieto, A. Silva, J. de Brito y J. M. Macías-Bernal

Revista: **Building, Research and Information**

Índice de Impacto - JCR (2015): 2.196,

posición nº 10 de 61 títulos incluidos en el campo Construction & Building Technology (Q1).

Aceptado: **22 noviembre 2016**

Publicación: **17 enero 2017**